

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

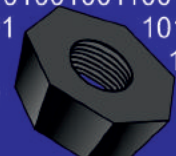
МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 1 (43) Т.3 2019



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 (43) Т.3 2019 www.morintex.ru

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

Огай С. А. д.т.н., доцент ректор, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

П.А. Шауб, д.т.н., профессор, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация

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

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»

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

Журнал включен 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

Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (на диске или по электронной почте: mit-journal@mail.ru)

Учредитель - издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале

190121 г.Санкт-Петербург, ул Лоцманская д.3

Телефон/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



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 (43) V. 3 2019 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

I.G. Zakharov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz"

G.A. Turichin, Doctor of Engineering, Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Malygin I.G, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

G.N. Muru, PhD, Executive Director, 51 CCIS

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre

K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University

S.P. Stoljarov, PhD, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

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

P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Yu. A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

Voyloshnikov M.V., Doctor of Engineering, Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation

F.F. Legusha, Dr. Sci.Phys.-Math., professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"

V. Yu.Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

N. A. Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index <http://vak.ed.gov.ru>

The magazine 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.

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

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ	стр
О журнале.....	8
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Небылов А.В., Небылов В.А. Проблемы создания и повышения эффективности применения больших экранопланов	10
Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Стариченков А.Л. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем	20
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Маслов В.И. Физическое моделирование аномальной волны в волновом бассейне.....	29
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Зыонг В.Т., Иванов В.П. К анализу влияния характеристик среднетоннажных наливных рыболовных судов на их эффективность.....	33
Грамузов Е.М., Любимов В.И., Февральских А.В., Смирнов К.В., Соснов А.В. Автоматизированная оптимизация компоновки крыла и горизонтального оперения экраноплана по результатам численного моделирования аэродинамики.....	38
Компанец В.А. Анализ гражданского флота, подконтрольного РМРС.....	48
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Аносов А.П., Восковщук Н.И., Шарапов Ю.К. Применение надувных эластичных оболочек для выполнения технологических операций при ремонте и испытаниях корпусов судов.....	52
Чулкин С.Г., Зиновьева Т.В., Пискунов В.А., Фомичев А.Б. Влияние конструктивных параметров на дальность заброса снаряда морского пневматического спасательного линемёта.....	60
Чулкин С.Г., Карпунина В.П., Фомичев А.Б. Разработка системы трубопроводов малого диаметра и ряда отдельных элементов опытного образца подводного манифольда.....	68
Чулкин С.Г., Стешенков А.Л., Бреки А.Д., Лысенков П.М. Математическое моделирование процесса обкатки гребных валов.....	76
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Ватолин Д. С. Системы контроля технического состояния судовых ДВС.....	87
Ищенко А.Д., Роенко В.В., Малыгин И.Г., Соковнин А.И. Перспективы и возможности осаждения дыма при пожарах энергетических установок и помещений судов (кораблей).....	91
Портнова О.С., Грибиниченко М.В., Куценко Н.В., Нитяговский А.В. Снижение продолжительности режима сухого трения осевых газовых подшипников при пусках и остановках турбомашин.....	98
Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Кожемякин В.О., Тихомиров Б. А. Безбойлерная система теплоснабжения с пароводяными струйными средствами циркуляции.....	103
Кожемякин В.В., Аполлова А.В., Кожемякин В.О., Иванов Р. А. Естественная циркуляция в промежуточном контуре с аргоновым теплоносителем.....	109
Аполлова А.В., Гайсина А.О., Кожемякин В.В. Квазистатические характеристики системы пассивного отвода тепла.....	115
Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Модернизация общей подmotorной рамы амортизированных дизель-генераторов 5AL25, находящихся в эксплуатации на рефрижераторных судах.....	122
Минасян М.А., Минасян А.М., Аунг Мьо Тхант, Киав Тхет Наинг Исследование вибрации общей несущей рамы дизель – генераторного агрегата в реальных условиях эксплуатации рефрижераторного судна.....	128

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

- Балабаев С.М., Ивина Н.Ф.** Влияние акустического взаимодействия пьезопреобразователей в гидроакустической антенне на ее основные характеристики..... 134
- Лобова Т.Ж., Сюань Линьлинь, Короченцев В.И., Грищенко В.В.** Исследование поля гидроакустического излучателя под слоем льда..... 139

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Фахми Ш.С., Селиверстов Я.А., Шаталова Н.В., Крюкова М.С., Хасан Я.А., Альмахрук Муhib, Махмуд Исмаил, Ковалёв К.Е.** Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов..... 145
- Александров И.В., Дюк В.А., Фомин В.В.** Использование методов машинного обучения для определения коэффициента расхода топлива газовой турбины фрегата..... 156

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Шпекторов А. Г., Фам Ван Туан** Нечеткое управление глубиной погружения телеуправляемого подводного аппарата..... 161
- Туркин И.И., Медведев В.В., Воршевский А.А., Калинин И. М.** Основные принципы создания сложных технических объектов с активными системами управления..... 166

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Исаев А.А., Мегей Е.С.** Методика выбора «конкурентоспособного направления» морских перевозок 174

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Золотухин Д.Е., Ивельская Т.Н.** Оценка цунамиопасности япономорских землетрясений с использованием численного моделирования цунами..... 178

CONTENTS		стр
About journal		9
SHIP BUILDING		
Alexander V. Nebylov, Vladimir A. Nebylov Problems of creation and improve the application of wig-craft.....		10
Dmitriy A. Skorokhodov, Valery YU. Kaminsky, Marin L. Marinov, Aleksej L. Starichenkov Motion control of displacement ships on crossing the sea.....		20
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES		
Vasilii I. Maslov Physical Modeling of Abnormal Wave In a Wave Basin.....		29
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE		
Thanh V. Duong, Vladimir P. Ivanov About using of fishing vessels with refrigerated sea water (RSW) tanks for Vietnamese marine fishery.....		33
Evgeniy M. Gramuzov, Viktor I. Lyubimov, Andrey V. Fevral'skikh, Kyrill V. Smirnov, Aleksandr V. Sosnov Automated optimization of wing and tail layout of ground-effect vehicle based on computational fluid dynamics.....		38
Vasiliiy A. Kompanets Analysis of civil fleet, controlled by the RMRS.....		48
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION		
Anatoly P. Anosov, Nikolay I. Voskovschuk, Yuri K. Sharapov Application of inflatable elastic shells for performance of process operations during repair and tests of ship's hulls		52
Sergey G. Chulkin, Tatiana V. Zinovieva, Vladimir A. Piskunov, Andrey B. Fomichov Influence of design parameters on the flight distance of shell of marine pneumatic life saving line-thrower.....		60
Sergey G. Chulkin, Victoria P. Karpunina, Andrey B. Fomichov Design of a small bore pipeline system and a series specific elements of prototype subsea manifold.....		68
Sergey G. Chulkin, Alexei L. Steshenkov, Alexander D. Breki, Pavel M. Lysenkov Mathematical modeling of the process of running-in propeller shafts.....		76
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)		
Dmitrii S. Vatolin Technical condition control system of ships ICE.....		87
Andrey D. Ishchenko, Vladimir V. Roenko, Igor G. Malygin, Artem I. Sokovnin Prospects and possibilities of smoke deposition in case of fires of power plants and vessels (ships).....		91
Olesya S. Portnova, Matvey V. Gribinichenko, Natalya V. Kytchenko, Andrey V. Nityagovskiy Decrease in duration of the mode of dry friction of axial gas bearings at start-up and stops of turbomachines.....		98
Anastasia V. Apollova, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Vladimin O. Kozhemyakin, Boris A. Tikhomirov Non-boiler heat supply system with steam-water jet means of circulation		103
Vyacheslav V. Kozhemyakin, Anastasia V. Apollova, Vladimin O. Kozhemyakin, Roman A. Ivanov Natural circulation in the intermediate circuit with argon heat carrier.....		109
Anastasia V. Apollova, Anastasia O. Gaisina, Vyacheslav V. Kozhemyakin Quasi-static characteristics of the passive heat removal system.....		115
Minas A. Minasyan, Aung Myo Thant, Armen M. Minasyan Modernization of the general sub-frame of damped diesel generators 5AL25 under operation on refrigerator ships.....		122
Minas A. Minasyan, Armen M. Minasyan, Aung Myo Thant, Kyaw Thet Naing Research of vibration of the general supporting frame of diesel - generator assembly in the real conditions of operation of the refrigerator ship.....		128

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

- Sergey M. Balabaev, Natalia F. Ivina.** The influence of acoustic interaction of the piezoelectric transducers in hydroacoustic antenna at its basic characteristics..... 134
- Tatyana Zh. Lobova, XUAN LINLIN, Vladimir I. Korochencev, Vladimir V. Grishchenko** Research of the field of a hydroacoustic radiator under the ice layer..... 139

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

- Shakeeb S. Fahmi, Yaroslav A. Seliverstov, Natalya V. Shatalova, Marina S. Kryukova, Yazeed A. Hasan, Almahrouk M. M. Ismael, Konstantin E. Kovalev.** Methods, coding algorithms and image classification of marine vessels..... 145
- Igor V. Aleksandrov, Vyacheslav A. Duke, Vladimir V. Fomin** The use of machine learning methods for the determination of the fuel consumption of a gas turbine frigate..... 156

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Andrei G. Shpektorov, Van Tuan Pham** Fuzzy control immersion depth remote controlled underwater vehicle..... 161
- Igor I. Turkin, Valery V. Medvedev, Alexander A. Worshevsky, Igor M. Kalinin** Basic principles of creating complex technical objects with active control systems..... 166

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

- Alexander A. Isaev, Ekaterina S. Megey** Method of choice the "competitive direction" of sea transportation..... 174

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

- Dmitriy E. Zolotukhin, Tatyana N. Ivelskaya** Assessment of tsunami risk of Japan sea earthquakes with use of numerical modelling of the tsunami..... 178

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» – это электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления.

Журнал включен 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.

Наш журнал включен в международную реферативную базу данных Web of Science.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте www.morintex.ru

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2015 года и с № 4(30) 2015 полные выпуски размещены в научной электронной библиотеке.

Подписной индекс 99366 в «Межрегиональном агентстве подписки» (МАП).

Журнал распространяется посредством подписки в МАП 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 (по отраслям)	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

ABOUT JOURNAL

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

The magazine 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.

Our log is included in the international abstract Web of Science database.

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

The magazine 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.

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

BY the organizations' request the magazine editorial office can send any magazine issue or the whole set of magazines in general.

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers according to the list of Supreme Attestation Commission: 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).

Basic Magazine Trends

- Intelligent technologies for designing of ships and vessels, computing of design process (control and organization of designing, automated designing systems). Marine History and Equipment.
- Intelligent technologies for ship and vessel building (advanced technologies for ship building, automated systems of production preparation, robot using).
- Intelligent technologies for ship and vessel operation (ship and vessel automation systems, automated control systems, problems in ergonomics, ecology).
- Intelligent technologies in applied researches (mathematical modelling and computer experiment, theory of structures, aerohydrodynamics, thermodynamics, physical fields of ship).
- Intelligent technologies in marine and ship power engineering. Energy-saving technologies.
- Intelligent technologies of marine instrument engineering.
- Artificial intelligence in marine technologies.
- Intelligent technologies in marketing researches
- Intelligent technologies in logistics

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 629.12.123

**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ БОЛЬШИХ ЭКРАНОПЛАНОВ****Александр Владимирович Небылов**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов

Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
тел. (812) 494-70-11 e-mail: nebylov@aanet.ru**Владимир Александрович Небылов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Международного Института Передовых Аэрокосмических Технологий (МИПАКТ)

Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
190008, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
тел. (812) 494-70-16 e-mail: vladnebylov@gmail.com**Аннотация**

Описывается мировой и российский опыт развития экранопланов, их достоинства и недостатки как скоростного амфибийного вида транспорта и возможные области их эффективного применения. Анализируются возможные причины и последствия заявленного Министерством промышленности и торговли России плана развития больших экранопланов при государственной поддержке.

Рассматриваются российские возможности по инновационному развитию больших экранопланов на базе основной профильной организации – АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е.Алексеева», а также тесно связанных с ней АО НПП «Радар ММС» и Концерна «Моринформсистема-Агат». Перечислены основные научно-производственные проблемы, требующие срочного решения для реализации плана возрождения экранопланостроения и совершенствования больших экранопланов, в том числе на основе перспективных средств автоматизации управления.

В числе преимущественных областей применения новых больших экранопланов выделены носители ракетного вооружения и арктические перевозки. Рассмотрен также проект запуска и посадки воздушно-космического самолета с помощью экраноплана, реализация которого может стать возможной при появлении экспериментальной транспортной платформы экранопланного типа.

Ключевые слова экранопланы, WIG-аппараты, экранный эффект, скоростной амфибийный транспорт, история и перспективы развития, новые области применения, направления совершенствования, система автоматического управления движением.

UDK 629.12.123

**PROBLEMS OF DESIGN AND IMPROVING EFFICIENCY
OF APPLICATION OF LARGE WING-IN-GROUND-EFFECT AMPHIBIOUS
CRAFT****Alexander V. Nebylov**Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department of Aerospace Measuring and Computing Complexes
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation 190000 St. Petersburg, ul. Bolshaya Morskaya,67, lit. A
tel. : +7 (812) 494-70-11, e-mail: nebylov@aanet.ru**Vladimir A. Nebylov**Ph.D. in Engineering Science, Senior Researcher at the International Institute of Advanced Aerospace Technology
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation 190008 St. Petersburg, st. Bolshaya Morskaya,67, lit. A
tel. : +7 (812) 494-70-16, e-mail: vladnebylov@gmail.com**Abstract**

The world and Russian experience of development of wing-in-ground-effect amphibious craft (WIG), their advantages and disadvantages as a high-speed amphibious type of transport and potential areas of their effective use are described. The possible causes and consequences of the plan for the development of large WIGs with state support, announced by the Ministry of Industry and Trade of Russia, are analyzed.

The opportunities in Russia for the innovative development of large WIGs are reviewed on the basis of the main relevant company - Central Design Bureau for Hydrofoil Ships named after R.Ye.Alekseev", as well as JSC NPP "Radar MMS" and Concern "Morinformsystem-Agat " closely connected with it . The main scientific and production problems are listed that require urgent solutions to

implement the plan for the revival of WIG construction and improve large WIGs, on the basis of promising management automation tools (inclusive).

Carriers of missile weapons and Arctic transport are identified among the preferred areas of application of new large WIGs. The project of launching and landing an aerospace plane using an WIG was also reviewed; the implementation of it may become possible with the appearance of an experimental WIG-type transport platform.

Key words WIGs, WIG-vehicles, ground effect, high-speed amphibious transport, history and development prospects, new areas of application, directions of improvement, the system of automatic motion control.

Введение

Экраноплан – неводоизмещающий морской транспортный аппарат, использующий в полете экранный эффект (WIG-эффект). Он состоит в увеличении подъемной силы крыла и уменьшении аэродинамического сопротивления при движении вблизи подстилающей поверхности. В этом случае действие воздушной подушки в пространстве между крылом и поверхностью добавляется к механизму формирования подъемной силы по закону Бернулли из-за различных скоростей воздушного потока над верхней и под нижней поверхностями крыла.

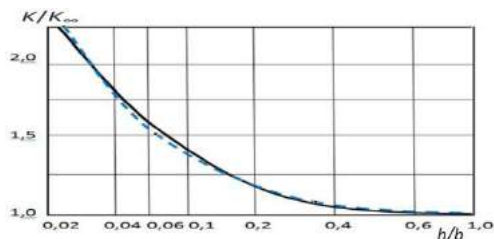


Рис. 1. Зависимость аэродинамического качества крыла экраноплана от высоты [1]

Типовая зависимость нормированного аэродинамического качества крыла экраноплана K/K_{∞}

от расстояния до поверхности h , нормированного к хорде крыла b , показана на рис. 1 сплошной линией. Ее простейшая аналитическая аппроксимация выражается формулой [1]

$$K/K_{\infty} = 1 + b/(25h) \text{ при } h/b \geq 0.03.$$

Ей соответствует пунктирная линия на рис. 1.

Существует несколько имен для этого летательного аппарата, используемых в разных странах. Основное англоязычное название – WIG-craft, или Ground Effect Machine (GEM). Русское оригинальное название «экраноплан» при переводе на английский имеет два варианта: ekranoplán и ekranopláne. Авторы считают второй вариант более правильным и активно его используют. Этим подчеркивается концептуальная близость экраноплана и к самолету (plane), и к судну.

В Японии экранопланы называют Wing in Surface Effect Ships (WISSES), подчеркивая связь экранопланов с судостроением, традиционно активно развиваемым в этой стране. Есть и другие варианты названия в Германии, Китае, Южной Корее, Австралии и некоторых других странах.

Первая конструкция экраноплана была создана финским инженером Tchéky Karyo зимой 1932 г. Примерно в то же время попытки построить экраноплан совершили также швед И. Тронг,

американец Д. Уорнер и россиянин П.И. Гроховский. Осуществить эти проекты тогда не удалось, поскольку конструкторы столкнулись со многими неизвестными ранее сложностями, преодоление которых требовало крупномасштабных исследований.

Только в 1950-х годах советский конструктор Р.Е. Алексеев в Нижнем Новгороде смог организовать такие дорогостоящие исследования и создать первые действительно летающие экранопланы. Его гениальная идея состояла в зеркальном по отношению к поверхности воды переносе малопогруженного в воду крыла в надводное воздушное пространство. Перед этим он изобрел и запустил в производство очень эффективные суда на малопогруженных подводных крыльях (СПК). Зависимость подъемной силы такого крыла от глубины обеспечивала стабилизацию движения аппарата с двумя крыльями в продольной плоскости, причем скорость движения в несколько раз превосходила скорость обычных водоизмещающих судов. Это изобретение и соответствующее революционное изменение в скоростном судостроении, активно используемое до сих пор, обеспечили Р.Е.Алексееву большой авторитет в СССР и прямой доступ к руководству страны. Поэтому ему удалось убедить председателя совета министров выделить финансирование и привлечь многие научные о конструкторские организации для решения проблемы построения экранопланов. Алексеев считал развитие аппаратов с крылом над поверхностью воды, как и СПК обладающих свойством самостабилизации движения в продольной плоскости, второй после СПК революцией в скоростном судостроении, обеспечивающей самолетные скорости движения неводоизмещающих судов. Им и его сотрудникам действительно были спроектированы и построены начиная с 1962 года более десяти разных больших экранопланов, включая крупнейший «КМ» с массой 540т (1966 г.), серийные десантные экранопланы «Орленок» (1979 г.), ракетный экраноплан «Лунь» (1990 г.). Все эти уникальные экранопланы были созданы по заказу ВМФ при значительном бюджетном финансировании.

Накопленный опыт позволял расширить список рассматриваемых проектов экранопланов, совершенствовать их и тиражировать их производство до десятков штук. Все эти возможности не были реализованы в связи с экономическим и идейным кризисом в СССР конца 80-х годов и распадом СССР в декабре 1991 года. Новая военная концепция России того времени не предусматривала строительство экранопланов для ВМФ. Перевод экономики на рыночные отношения

не предусматривал развитие гражданского экранопланостроения за бюджетные деньги.

Малые экранопланы пытались разрабатывать несколько малых и средних предприятий в России, но без особого успеха. Постепенно лидирующие позиции по количеству построенных экранопланов, особенно больших, стал занимать Китай. В основном это были копии советских экранопланов, построенные в Китае под руководством нескольких российских специалистов, работавших по контрактам. Российское государство не могло запретить такой канал утечки технологической информации, но не позволяло продавать в другие страны экранопланы, построенные в России. Это ставило в тяжелое финансовое положение и «ЦКБ по СПК», и другие фирмы, которые потеряли и бюджетное, и валютное финансирование. Такой «мертвый сезон», губительный для экранопланостроения, продолжался в России 20 лет. Только в начале 2010-х годов стали появляться осторожные высказывания об ошибочности игнорирования государством опасности полной утраты экранопланной технологии и необходимости найти область эффективного применения экранопланов при государственной поддержке, прежде всего по линии МЧС и Минобороны. Радикальный поворот в оценке важности дальнейшего развития экранопланостроения стал особенно проявляться в 2018 г. [2,3,4]. Несколько российских министров подтвердили намерение России построить новый тяжелый экраноплан до 2027 года. Опубликованные подробности этих планов мы рассмотрим далее.

Бюджетное финансирование для нового поколения российских экранопланов могло бы появиться на 15 лет раньше, если бы оказался успешным американский проект экраноплана (эксанолета) “Boeing Pelican –ULTRA”, анонсированный в 2002 году. При реальной разработке Боингом этого сверхтяжелого экраноплана со взлётной массой 2700 т. и грузоподъёмностью 1200т Россия в качестве ответного шага безусловно выделила бы деньги на возрождение российского экранопланостроения с учетом имеющегося в «ЦКБ по СПК» задела и попыталась бы не позволить никому захватить лидерство в создании больших экранопланов. Конкуренция переросла бы из технико-экономической области в политическую, а при борьбе за престиж государства деньги обычно находятся быстро. Первоначально фирма Boeing Phantom Works утверждала, что аппарат может быть создан с применением уже существующих американских технологий и не потребует долгих разработок. Увы, реальные сложности разработки были очевидно недооценены. Уже на следующий год сообщения об успехах разработки “Boeing Pelican –ULTRA” пропали, последнее официальное упоминание о проекте датируется 2003 годом. К сожалению, неудача с этим чрезвычайно интересным проектом, как и со многими другими в разных странах, прибавляли скепсиса в оценке перспектив мирового экранопланостроения. Потребовалось еще 15 лет, чтобы в России наконец созрели условия для разработки нового поколения экранопланов.

1. Классификация экранопланов

В соответствии с габаритами и взлетной массой экранопланы разделяют на малые, средние и большие.

Малые экранопланы массой до нескольких тонн с размером до десяти метров предназначены для перевозки от 1 до 8 пассажиров над реками и озерами.

Средние экранопланы массой 10-50 т с размером в несколько десятков метров могут перевозить около 100 пассажиров над умеренно взволнованным морем.

Большие экранопланы со взлетной массой более 100 т и размером более 50 метров могут перевозить сотни пассажиров над взволнованным океаном.

Очень большие экранопланы массой более 1000 т. могут также рассматриваться как перспективные, практически не имеющие ограничений в эксплуатации, связанных с погодой.

Две особенности могли бы характеризовать последние три десятилетия в развитии экранопланов. Коммерческие малые экранопланы были разработаны в нескольких странах, но серьезные попытки построить автоматическую систему управления движением для экранопланов не предпринимались. Рыночная конъюнктура требовала дешевых аппаратов, а средства автоматизации могли удорожить проекты. Постепенно стало ясно, что современные средства автоматического управления должны устанавливаться и на коммерческие экранопланы. Автоматическая система управления должна разрабатываться параллельно с созданием самого экраноплана и определять его динамические характеристики. Особенно важно, чтобы аппараты даже без запаса устойчивости можно было считать допустимыми при их высоком аэродинамическом качестве и минимальном потреблении топлива. Обеспечение устойчивости полета может быть возложено полностью на автоматическую систему управления, надежность и отказобезопасность которой должна быть гарантирована.

Стоимость автопилота для малого экраноплана мелкосерийного производства была оценена [5] приблизительно в 70-100 тыс. долларов, и эта сумма лишь немного возрастает с увеличением массы аппарата (главным образом за счет более развитых силовых приводов). «Справедливая» стоимость простого в строительстве 6-8-местного экраноплана составляет 250-400 тыс. долларов, и это делает невозможным включение требуемого автопилота в состав его оборудования. Поэтому установка автопилотов и других средств автоматизации управления пока оправдана лишь на больших экранопланах, но по мере совершенствования и удешевления средств автоматизации управления они начнут применяться на всех WIG-аппаратах.

2. Преимущества и недостатки экранопланов

За прошедшие в процессе борьбы за возрождение экранопланов годы понимание их достоинств и недостатков эволюционизировало как за счет накопленного опыта проектирования, так и

за счет изменения ситуации на рынке транспортных услуг.

На начальном этапе развития экранопланостроения основным их достоинством считалось более высокое по сравнению с самолетами аэродинамическое качество, приводящее к экономии топлива при полете в экранном режиме. В идеальном случае полета на высоте 1/10 от хорды крыла аэродинамическое качество может в 2-3 раза превышать самолетное, но для этого подстилающая поверхность должна быть совершенно ровной (море в штиль или искусственная ровная поверхность, как в японском проекте поезд-экрanoплан). На практике неровности поверхности не позволяют летать на указанной малой высоте и реальная экономия топлива обычно не превышает 30%. Но эта экономия практически уничтожается необходимостью возить мощные стартовые двигатели, не нужные в крейсерском полете.

Вторым действительно важным достоинством экраноплана всегда являлась способность взлетать с любой достаточно ровной поверхности и, более того, обычно достигаемое свойство амфибийности. Эта способность, как уже отмечалось, достается не бесплатно, а обеспечивается за счет избыточного по сравнению с самолетами запаса мощности двигателей и в итоге веса двигателей, снижающего вес полезной нагрузки. Взлет с аэродрома с использованием колесного шасси позволяет не решать проблему преодоления горба гидродинамического сопротивления и не возить избыточные двигатели. В любом случае для операционного обслуживания экраноплана нужна хотя бы минимальная инфраструктура на суше, поскольку постоянное пребывание в соленой воде несомненно вредно для длительного сохранения требуемых прочностных качеств корпуса из легких авиационных сплавов. Используемые в судостроении сплавы соленой воды не боятся, но они более тяжелые. Попытки применить при взлете экраноплана с воды статическую воздушную подушку, создаваемую специальным вентилятором, пока не оказались удачными, поскольку также требовали при взлете дополнительного оборудования, не используемого в крейсерском полете при работе динамической воздушной подушки. Технологию конвертоплана (гибрид самолёта и вертолётa с поворотом вектора тяги двигателя на 90° после взлета) также применить к экраноплану пока не удалось.

Создание в море специальной эстакады для взлета экраноплана привязывает тактику его использования к этой точке и существенно снижает его тактические возможности. Отказ от возможности взлета с воды в пользу взлета только с аэродрома также резко снижает круг потенциальных потребителей экраноплана, что и доказал проект "Boeing Pelican –ULTRA".

Экрanoплан нельзя лишать возможности взлета и посадки в любой точке океана, поскольку она обеспечивает более высокую безопасность полетов по сравнению с самолетом. При отказе двигателя или какого-либо другого элемента оборудования экраноплана двигатели выключают и аппарат плавно опускается на воду без какого-

либо риска для пассажиров, причём это не требует совершения каких-либо предпосадочных манёвров. После устранения неисправности возможен взлет и продолжение полета в требуемую точку, что совершенно нереализуемо для самолета. Сама неисправность двигателя не столь опасна для крупных экранопланов ввиду того, что они имеют несколько двигателей, разделённых на стартовую и маршевую группу, и неисправность двигателя маршевой группы может быть компенсирована запуском одного из двигателей стартовой группы.

Полная безопасность полета вместе с привычным «наземным» видом из иллюминатора безусловно привлечет многих потенциальных пассажиров, которые боятся больших «авиационных» высот.

В отличие от водоизмещающих судов экранопланы могут летать не только над морем, но и над сравнительно ровными участками суши. Например, можно перелетать из одной акватории в другую через перешеек. Можно организовать транспортное обслуживание внутренних водоемов, районов пустыни, тундры. Все эти возможности могут оказаться существенными при оценке гражданских областей эффективного применения экранопланов.

Таким образом, основой гражданского применения экранопланов может быть не экономия топлива и пониженная стоимость билета, а новые возможности при прокладке транспортных маршрутов, не доступных ни для самолетов, ни для судов.

Конечно, районы традиционного интенсивного судоходства могут быть сделаны запретными для экранопланов, чтобы избежать опасности столкновения или взаимных помех движению этих транспортных аппаратов со столь разными скоростями. Для других районов важно обеспечить надежную работу системы предупреждения столкновений экраноплана с конфликтующими объектами, автоматически выбирающую вид маневра экраноплана в горизонтальной или вертикальной плоскости для ликвидации опасности столкновения с подвижными или неподвижными препятствиями, обнаруженными радиолокационными средствами. Для больших экранопланов такая система обязательна.

К основным недостаткам экранопланов справедливо относят ограничения для взлета, связанные с сильным морским волнением, и недостаточную маневренность из-за необходимости осуществлять повороты без крена, только за счет руля направления.

Существенной проблемой для экранопланов может являться их ограниченная устойчивость движения в продольной плоскости. Она выражается в том, что при смене высоты полета центр приложения подъёмной силы смещается. Нос судна ведёт себя нестабильно и может задеть водную поверхность или, наоборот, слишком резко подняться вверх с резким уменьшением скорости и падением на хвост, что и послужило причиной нескольких аварий построенных в разных странах экранопланов. Запас устойчивости можно безусловно обеспечить средствами автоматического управления, которые обязательно

должны устанавливаться на современных экранопланах [7-14].

Очень важным достоинством экранопланов уже давно считается эффективность их использования в поисково-спасательных операциях при авариях на море. Экраноплан может не только быстро прибыть на место аварии, но и очень успешно действовать по спасению людей из воды. В отличие от судов с высоким бортом экраноплан с крылом на поверхности воды может принимать спасаемых людей очень быстро. Действия экраноплана могут быть очень эффективными также в зоне наводнения. Самолет обычно не может приземлиться в непосредственной близости от зоны бедствия, ограничиваясь сбросом спасательных плотов, но не всегда с требуемой точностью. Не случайно среди небольшого числа рассматриваемых реальных экранопланов два из них имеют название «Спасатель» (проект 1991 г. и анонсированный недавно перспективной проект универсальной экранопланной платформы). Заметим, что функции спасательного аппарата может выполнять практически любой экраноплан, даже построенный с совершенно другими целями. Но специально построенный «Спасатель» может иметь на борту и необходимое медицинское оборудование, и лежащие места для большого числа раненых. Возможности МЧС были бы существенно расширены при появлении такого аппарата [15].

3. Особенности военного применения экранопланов

Следует признать, что практически для всех проектов экранопланов основные аргументы в пользу эффективности использования были и очевидно будут связаны с особенностями их военного применения. Два варианта использования при этом считаются основными.

Для амфибийных экранопланов заманчивым является применение в качестве десантного корабля, способного высадить с моря на достаточно пологий берег десант с поддерживающей его бронетехникой и без опасности пострадать от минного вооружения противника. Высокая скорость движения и очень быстрая выгрузка десанта непосредственно на берег рассматриваются как существенные преимущества перед водоизмещающими десантными кораблями. Расстояние между точками посадки и выгрузки десанта может составлять несколько тысяч километров. Например, для десантного экраноплана «Орленок» (рис.2) она составляла 1500 км при грузоподъемности 20 т [2].

Может стать актуальной и быстрая переброска больших воинских контингентов на межконтинентальную дальность (как это планировалось в проекте «Boeing Pelican –ULTRA»), но конкуренция с тяжелыми самолетами в этой области значительна, особенно при развитой сети аэродромов.

Построение экраноплана - носителя противокорабельных ракет также актуально, это доказано российским опытом летных испытаний экраноплана «Лунь» (рис.3) со взлетной массой 380т. Утверждается, что авианосцы противника не

смогут предотвратить ракетный удар с летящего экраноплана, поскольку низкая радиолокационная заметность экраноплана не позволит заблаговременно обнаружить летящий на малой высоте экраноплан. Экраноплан благодаря высокой скорости движения (порядка 500 км/час) и незаметности для радаров может подходить к авианосцам на расстояние точного пуска управляемой ракеты [3,4,16,18]. Построение таких экранопланов может рассматриваться как «асимметричный» сравнительно дешевый ответ на развитие дорогостоящих авианосцев.

По-видимому, низкая различимость экраноплана на фоне взволнованного моря является в понимании военных основным его достоинством, обеспечивающим скрытность передвижения. Конечно, со спутников мониторинга поверхности Земли большой экраноплан можно легко обнаружить, особенно при применении доплеровских фильтров. Однако быстро довести данные слежения за экранопланом со спутника до наземного или надводного командного пункта не просто и эти данные всегда будут отставать во времени от реальной траектории движения экраноплана. Следовательно, отслеживать экраноплан труднее, чем самолет, но, с другой стороны, самолет летает быстрее экраноплана.

Поэтому вопрос о сравнении скрытности движения экраноплана и самолета вообще говоря требует специального исследования с учетом многих обстоятельств. Однако эти подробности обычно не комментируются в заявлениях для прессы, которые делают представители ВМФ и министры в России. Единодушно высказываемое ими в последних заявлениях мнение состоит в том, что скрытность низковысотного движения экраноплана является его главным достоинством и определяет необходимость возрождения строительства больших экранопланов в России на основе использования современных и перспективных достижений авиастроения и кораблестроения.

Кроме радарной малозаметности, к числу решающих аргументов по оправданию целесообразности развития экранопланов с финансированием из бюджета МО относится их арктическое применение. Огромная территория Арктики в последние годы привлекает все большее внимание многих стран и как пока слабо освоенное транспортное пространство (в частности, Северный морской путь), и как территория со многими полезными ископаемыми. Большую часть года Арктика покрыта льдом, в основном без высоких торосов. Прилегающая к Арктике тундра также удобна для полета экранопланов. Арктика и тундра являются районами, над которыми удобно прокладывать траектории полета межконтинентальных ракет. Соответственно, там нужны военные базы, требующие определенного снабжения и средств доставки персонала из районов с более благоприятными условиями жизни. Все такие задачи способны (по высказываниям военных) решить экранопланы, которые могут летать и над льдом, и над водой, и над снегом. Действительно, судоходство в Арктике с помощью ледокола энергетически очень невыгодно, а в тундре вообще можно использовать

только вертолеты и экранопланы, причем преимущество экранопланов несомненно. Долгое время после развала СССР военные отказывались от финансовых затрат на создание экранопланов, поскольку у теоретиков не было внятной доктрины их применения. Не ясна была и рекомендуемая тактика применения экранопланов вместе с кораблями и авиацией. И ВМФ, и авиация не хотели включать экранопланы в свой состав (в дополнение к чему-то или вместо чего-то). Теперь в связи с ускоренным освоением Арктики некая доктрина появилась. Правда, пока нет проверенного практикой опыта полетов экранопланов над высокими торосами, эта проблема требует специального исследования.

4. Особенности применения экранопланов при горизонтальном запуске и посадке космических аппаратов

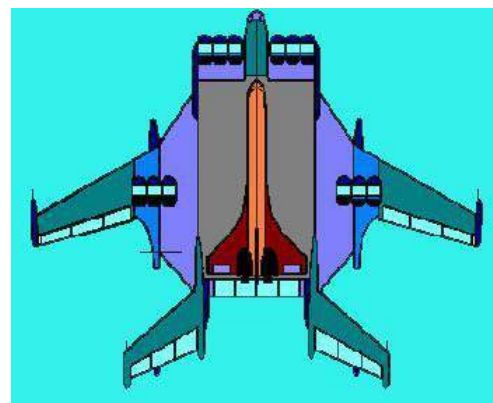
Многочисленные попытки снизить стоимость запуска спутников на низкую орбиту, которые были предприняты во многих странах, характеризуют нынешнюю тенденцию к экономически рентабельным и менее дорогостоящим космическим проектам. К сожалению, этот процесс не привел к резкому снижению удельных затрат на запуск.

Многообещающая идея сделать запуск дешевле состоит в переходе от вертикального к горизонтальному запуску, в котором используется воздушно-реактивный двигатель.

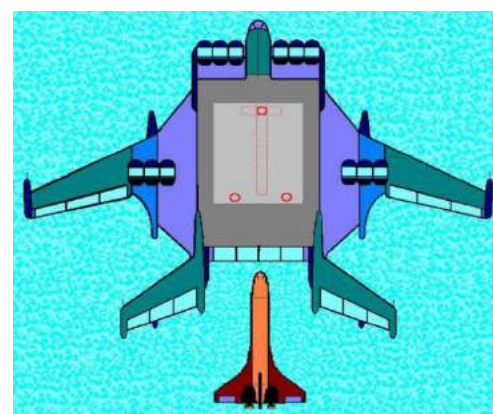
Исследования в области горизонтального запуска спутников (HTHL) проводились в разных странах. Авторы долго работали над проектом системы запуска с экранопланом в качестве ускорителя для воздушно-космического самолета (ВКС) и мобильной посадочной полосы для ВКС. Этот проект был предложен Н. Томита, Й. Охками и А. Небыловым в 1996 году [6], и с тех пор детально исследовался в целях технико-экономического обоснования эффективности [17].

Экраноплан может дать ВКС начальную скорость Mach 0.6 в нужном направлении, что позволяет снизить требования к площади гиперзвукового крыла ВКС и его двигателям. Многие другие преимущества связаны с возможным использованием экраноплана для посадки ВКС. Тяжелый экраноплан является единственным средством для реализации инновационной идеи стыковки нисходящего ВКС на определенном этапе, позволяющей расширить возможности посадки ВКС. Неоднократно обсуждалась технология горизонтальной посадки ВКС без шасси путем стыковки с экранопланом на последнем этапе посадки и соответствующие требования к системам управления.

Конфигурация экраноплана и ВКС при запуске и посадке показана на рис.2.



а)



б)

Рис. 2. Экраноплан и ВКС: а) состыкованные; б) подготовка к стыковке

Можно назвать четыре основные причины для обоснования использования экраноплана в качестве дополнительного компонента в космической транспортной системе, который помогает в запуске и посадке ВКС:

1. Точка запуска и точка посадки могут быть выбраны в любой области океана, что дает широкие возможности для выбора траектории полета и посадки ВКС.

2. Экраноплан может нести более тяжелый ВКС, чем самолет, и придать ему необходимую начальную скорость.

3. Космодром со специально подготовленной взлетно-посадочной полосой абсолютно не требуется.

4. ВКС может оборудоваться упрощенным и облегченным шасси или вообще не иметь шасси при приземлении на экраноплан, если экраноплан перемещается со скоростью, равной скорости ВКС. Большая экономия массы будет обеспечена, если все оборудование для стыковки является аксессуаром экраноплана. Вес снаряжения для посадки на ВПП может составлять приблизительно 3% от пустой массы или 25-30% полезной нагрузки. Таким образом, использование экраноплана может увеличить полезную нагрузку ВКС на 30% и соответственно снизить удельную стоимость запуска на те же 30%. Важной причиной того, что разумное использование горизонтального запуска является целесообразным, является большая свобода выбора времени и места запуска. Если необходимо запустить спутник или космический

корабль со стационарной платформы на строго predetermined орбиту, это может быть сделано в определенный промежуток времени («окно запуска»). При горизонтальном запуске с возможностью правильного выбора направления разгона окно запуска существенно расширяется.

Проблема выбора типа экраноплана для системы «ВКС+Экраноплан» очень актуальна. Определенные наработки по этому вопросу были выполнены Р.Л.Бартини в его известном проекте экраноплана-авианосца.

Вариант посадки ВКС на палубу движущегося экраноплана с использованием стыковки предъявляет самые жесткие требования к точности и надежности систем управления движением [17].

5. Достижения и сложности возрождения российского экранопланостроения

Как уже было сказано, за двадцать лет активной работы по развитию больших экранопланов с 1970 по 1990 г. российское «ЦКБ по СПК» с его партнерами достигло значительных результатов и стало безусловным лидером в мировом экранопланостроении. Следующие 20-25 лет оказались периодом застоя в этой области в связи с утратой финансирования со стороны российского ВМФ. Другие рыночные механизмы финансирования строительства больших экранопланов за это время не появилось, да и в малых экранопланах тоже особого прогресса не наблюдается.

Одной из причин вновь возникшего интереса к экранопланам у российского руководства является понимание того, что в настоящее время существует последняя возможность сохранить опыт прошлых лет и связать его с современными достижениями в развитии новых информационных и кораблестроительных технологий. Специалисты, активно работавшие в 1990 г., в большинстве своем сейчас уже пенсионеры и вскоре уже не смогут передать свой опыт вновь создаваемым молодым коллективам. Каких-либо документальных носителей такого опыта осталось мало, поскольку эпоха массовой компьютеризации проектирования и использования электронных носителей информации наступила в России позже, а режим секретности не позволял тиражировать описание результатов многочисленных исследований в разумном количестве. За прошедшие годы не все ценные результаты удалось сохранить.

Понимая это, ответственные специалисты ВМФ стали менее критично оценивать недостатки экранопланов и допускать возможность некоторого бюджетного финансирования новых исследований и разработок, опирающихся на старые практические достижения и новые научные результаты [2-4]. Наиболее неприятным последствием отсутствия бюджетного финансирования для России было бы внезапное появление эффективных экранопланов в других странах и утрата российского лидерства. Обычно такая ситуация приводит к неприятным для бюрократов кадровым решениям. Поэтому сейчас разумно предоставить ЦКБ последний шанс сохранить лидерство и добиться реальных

результатов по проектированию, строительству и внедрению экранопланов.

Обратим внимание на следующие высказывания [2-4,16,18].

1. На авиасалоне МАКС-2015 начальник Морской авиации ВМФ России Игорь Кожин заявил, что флот вскоре рассчитывает получить универсальную платформу экранопланного типа грузоподъемностью до 300 т. Позднее председатель совета директоров ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р.Е.Алексеева Георгий Анцев сообщил ТАСС, что разработка перспективного универсального экраноплана в интересах Минобороны России находится на стадии эскизного проектирования.

2. Минобороны России в рамках Госпрограммы вооружений — 2027 (ГПВ-2027) разрабатывает экраноплан, на борту которого будут размещены ракеты, заявил глава Минпромторга Денис Мантуров на международной выставке «Гидроавиасалон-2018». Он рассказал, что экраноплан планируют использовать для патрулирования Черного и Каспийского морей, а также для охраны Северного морского пути. Мантуров добавил, что особенностью данного аппарата будет то, что на его борту разместят ракетное вооружение.

3. В конце июля 2018г. вице-премьер Юрий Борисов рассказал, что к 2027 году в России должны создать опытный образец экраноплана «Орлан». По словам Борисова, экраноплан можно будет применять как для охраны и патрулирования, так и для спасения экипажей судов.

Все указанные источники утверждают, что новый большой экспериментальный экраноплан (экспериментальная экранопланная платформа) будет создан до 2027 г., а средний по размерам экраноплан А-050 с грузоподъемностью 9т появится возможно в 2022 г.

Основным идеологом и генератором этих планов в России является сейчас генеральный директор - генеральный конструктор АО «Концерн «Моринформсистема - Агат» Г.В. Анцев, являющийся одновременно генеральным директором — генеральным конструктором входящего в «Агат» АО «Научно-производственное предприятие «Радар ММС» в Санкт-Петербурге. Кроме того, Г.В. Анцев является генеральным конструктором «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева» и председателем его совета директоров. С учетом такого сочетания ответственных должностей Георгия Анцева следует рассматривать как ключевую персону в возрождении российского экранопланостроения. Заявлено о стратегическом партнерстве «Радар ММС» и «ЦКБ по СПК». Ресурсы этих предприятий и Концерна «Агат» подключены к проектированию новых экранопланов. Под гарантию этого успешного администратора и целеустремленного специалиста проще выделять деньги, которых нужно вложить не мало. Собственно в ЦКБ в настоящее время отсутствуют столь крупные и влиятельные фигуры, оно полностью опирается на сотрудничество с «Радар ММС». Компания «Радар ММС» сейчас является держателем контрольного пакета акций «ЦКБ по СПК» и производит инвестиции в это предприятие. Построение

крупных экранопланов сейчас однозначно поручено «ЦКБ по СПК», как и 50 лет назад.

Однако реально для возрождения экранопланостроения нужен не только сильный проектант, но и соответствующая производственная организация. Ранее эту роль выполнял опытный судостроительный завод «Волга», созданный в 1970 году при «ЦКБ по СПК» и территориально совмещенный с ним. Именно на «Волге» были разработаны и освоены уникальные технологии постройки экранопланов «Орленок» и «Лунь».

Сейчас производственные связи завода «Волга» и ЦКБ не так сильны. В 1992 году предприятие было преобразовано в открытое акционерное общество «Судостроительный завод «Волга». Сейчас у него есть заказы, не связанные с экранопланами, и заинтересовать это предприятие возрождением постройки экранопланов будет не просто, особенно после печальной истории с последним экранопланом «Спасатель», который десятилетие занимал производственные площади «Волги» в состоянии 90% готовности к спуску на воду, но так и не дождался необходимого финансирования. Если новый экспериментальный «Спасатель» по размерам будет не меньше «Луны», то такой крупноразмерный аппарат потребует либо полной загрузки «Волги», либо поиска другого места постройки, возможно на предприятиях Санкт-Петербурга либо на возрождающемся заводе «Море» в Феодосии.

Такая перестройка отношений потребует времени и организационных усилий. Не случайно в планы заложен почти десятилетний срок постройки нового «Спасателя».

Также есть вероятность, что будет найдено новое, пока не известное применение экраноплана и это будет стимулировать быстрое создание большого экраноплана с широким диапазоном областей использования [18].

В любом случае создать эффективный современный экраноплан широкого применения можно только при успешном решении следующих задач.

1) Разработка совершенной аэро-гидродинамической схемы экраноплана, позволяющей обеспечить совместное выполнение требований по обеспечению повышенного аэродинамического качества во всех допустимых режимах полета, приемлемую мореходность в водоизмещающем режиме движения и желательное свойство амфибийности.

2) Создание турбореактивных и турбовинтовых двигателей большой мощности, способных экономично и долговременно работать вблизи поверхности воды, в воздушной среде с солеными водяными брызгами.

3) Создание высокоточных датчиков метровых высот полета над водой (радиотехнических, лазерных, рентгеновских, РМД...). Допустимая ошибка – 3 см, Авиационные датчики «малых высот» не годятся. Кроме высоты, желательно отслеживать профиль морских волн или определенный участок трехмерной волновой поверхности.

4) Создание системы автоматического управления движением экраноплана, способной автоматизировать и оптимизировать как крейсерский режим движения вблизи поверхностей с разными геометрическими свойствами, так и маневрирование в продольной и боковых плоскостях, причем без риска потери устойчивости полета. Координированный поворот должен выполняться при минимальном крене и желательном почти без увеличения высоты.

5) Решение проблемы предупреждения столкновений экраноплана с подвижными и неподвижными препятствиями за счет своевременного обнаружения и отслеживания таких препятствий локационными средствами и быстрого принятия решения на маневр по расхождению в горизонтальной или вертикальной плоскости.

6) Решение проблемы полной автоматизации и оптимизации взлета экраноплана с взволнованной поверхности моря, что позволит взлетать при предельно большой высоте волн и минимально возможной суммарной мощности двигателей для преодоления «горба» гидродинамического сопротивления. Фактически режим взлета определяет мореходность экраноплана, поскольку крейсерский полет возможен при большей балльности морского волнения, чем при взлете.

7) Построение специальных дисплеев для отображения пилоту в каждом конкретном режиме движения всей необходимой пилотажно-навигационной и иной информации с учетом специфики полета экраноплана. Это заставляет разрабатывать и новые технологии подготовки пилотов для экранопланов, гарантирующие безошибочные их действия в штатных и аварийных режимах движения как в воздухе, так на воде или на твердой поверхности.

Часть указанных задач уже в определенной мере исследована [6-14, 19].

Заключение

В статье проанализированы обстоятельства возможного сейчас возобновления разработки и производства больших экранопланов в России при поддержке государства. Дан обзор высказываний министра промышленности и торговли России Д. Мантурова и других ответственных специалистов по указанному вопросу. Еще три года назад в российской прессе утверждалось обратное, и говорилось о нецелесообразности государственного финансирования разработки новых больших экранопланов, в которых никто не заинтересован. По-видимому, и об этом открыто говорится, сейчас изменилась позиция Минобороны и оказались востребованы еще советские наработки по ракетным и транспортным экранопланам, полезным для борьбы с авианосцами [21] и для круглогодичного транспортного обслуживания арктических и других труднодоступных районов России, их патрулирования. Определенную роль сыграло усиление патриотических настроений в российском обществе и призывы развивать отечественные инновации, обеспечивая эффективные асимметричные ответы на усиливающуюся в мире

гонку вооружений. Поставлена задача разработки «экспериментальной транспортной платформы экранопланного типа» со взлетным весом 600т к 2027 году, а впоследствии и более тяжелых аппаратов.

Оценены российские возможности по инновационному развитию больших экранопланов на базе АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е.Алексеева», а также тесно связанных с ней АО «Радар ммс» и Концерна «Моринформсистема-Агат».

Сформулированы основные научно-производственные проблемы, требующие решения для реализации плана возрождения экранопланостроения и совершенствования больших экранопланов, в том числе на основе перспективных средств автоматизации управления движением.

Учитывая заработанную еще в советское время высокую репутацию российского экранопланостроения и уникальные пока не превзойденные в мире результаты, новые российские достижения в этой области или даже попытка их достижения могут оказаться интересными для многих стран и повлиять на мировой уровень развития этого скоростного вида транспорта.

Благодарность

Исследование было поддержано в основном Российским фондом фундаментальных исследований по проекту №18-08-00234. Раздел 5 подготовлен при поддержке Российского научного фонда по проекту16-19-10381.

Литература

1. Nebylov, Alexander, Nebylov, Vladimir, FABRE, Pierre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea. ACNAAV 2015 : IFAC Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace. Seville, Spain, 2015. Pp. 102-107.
2. Центральное Конструкторское бюро по судам на подводных крыльях. URL: www.wikipedia.org
3. Иванов Вадим. В России начата разработка перспективного ракетного экраноплана. URL: <https://tvzvezda.ru/news/opk/content/201809081315-xccm.htm> (дата обращения 09.10.2018)
4. Мантуров Д. Минобороны РФ разрабатывает ракетный экраноплан. URL: <https://regnum.ru/news/2478027.html> (дата обращения 09.10.2018)
5. Boeing Pelican. Wikipedia, 2002. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_Pelican (дата обращения 09.10.2018)
6. Небылов, А.В., Небылов, В.А. Проблемы, теория и системы автоматического управления движением экранопланов / А.В. Небылов, В.А. Небылов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, ИПУ РАН, 2014. С. 3391-3400.
7. Tomita, N., Nebylov, A.V. et al. Performance and Technological Feasibility of Rocket Powered HTHL-STO with Take-off Assist / N.Tomita, A.V. Nebylov. Acta Astronautica, 45, No.10, 1999. Pp. 629-637.
8. Nebylov, A.V.; Wilson, P.A. Ekranoplane - Controlled Flight Close to the Sea / A.V. Nebylov, P.A. Wilson. Southampton: WIT-press, UK, 2001. 236 p.
9. Nebylov, Alexander; Nebylov, Vladimir Metrology problems of WIG-craft motion control / Alexander Nebylov, Vladimir Nebylov // 5th International Workshop of Metrology in Aerospace (MetroAeroSpace), Rome, Italy, 2018. 6 p.
10. Небылов, А.В., Небылов, В.А. Российские экранопланы: новые перспективы в международном сотрудничестве / А.В. Небылов, В.А. Небылов. М.: Русский инженер. 2013. № 4. С. 33-36.
11. Небылов, А.В. Проблемы и методы синтеза автопилота тяжелого экраноплана // А.В. Небылов. СПб.: Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 2. С. 15-22.
12. Nebylov, A.V., Aerospace Sensors / A.V. Nebylov. N. Y.: Momentum Press., USA. 2012. 560 p.
13. Nebylov, A.V., Nebylov, V.A. Wing-in-Ground Effect Vehicles : Modern Concepts of Design and New Role of Automatic Control / A.V. Nebylov, V.A. Nebylov // 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS). EUCASS Association, 2009. Pp. 1-10.
14. Nebylov, A.V.; Watson, J. Aerospace Navigation Systems / A.V. Nebylov, J. Watson. London: John Wiley & Sons. Ltd, UK, 2016. 378p.
15. Pereyaslov, A.N. The conceptual and practical bases for the use of ekranoplanes in EMERCOM of Russia / A.N. Pereyaslov. M.: Civil Security Technology. Vol.9, №2 (32), 2012. Pp.78-84.
16. ТАСС. Опытный образец экраноплана с ракетным вооружением создадут в России до 2027 года. URL: <https://tass.ru/armiya-i-opk/5412967> (дата обращения 09.10.2018)
17. Nebylov, A.V. et al. Study of a Sea Launch Concept of Aerospace Shuttle with Heavy Class Ekranoplane as Takeoff and Landing Assist / A.V. Nebylov, E.A. Aframeev, N.P. Savichenko, N. Tomita, Y. Yoshida // 6th Intern. Symposium on Marine Engineering. The Marine Engineering Society of Japan, Tokyo, 2000. Pp. 744-750.
18. Поляков А. Экраноплан возвращается. URL: <https://inosmi.ru/social/20171117/240785601.html> (дата обращения 09.10.2018)
19. Ганин, С. М. Создание экранопланов: от прошлого века до наших дней / С. М. Ганин. СПб.: Транспорт Российской Федерации, № 6 (55), 2014. С. 54-59.
20. Экраноплан «Пеликан». URL: https://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2002/september/i_pw.html (дата обращения 09.10.2018)
21. Мельников Р. В США признали опасность российских ракетных экранопланов. URL: <https://rg.ru/2018/07/31/v-ssha-priznali-opasnost-rossijskih-raketnyh-ekranoplanov.html> (дата обращения 19.11.2018)

References

1. Nebylov, Alexander, Nebylov, Vladimir, FABRE, Pierre. WIG-craft Flight Control above the Waved Sea. ACNAAV 2015 : IFAC Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace. Seville, Spain, 2015. Pp. 102-107.
2. Central'noye konstruktorskoye byuro po sudam na podvodnykh krylyach. URL: www.wikipedia.org
3. Ivanov Vadim. V Rossii nachata razrabotka perspektivnogo raketnogo ekranoplana. URL: <https://tvzvezda.ru/news/opk/content/201809081315-xcm.htm> (дата обращения 09.10.2018)
4. Manturov D. MinOborony RF razrabatyvaet raketny ekranoplan. URL: <https://regnum.ru/news/2478027.html> (дата обращения 09.10.2018)
5. Boeing Pelican. Wikipedia, 2002. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_Pelican (дата обращения 09.10.2018)
6. Nebylov, A.V., Nebylov, V.A. Problemy, teoriya i sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem ekranoplanov / A.V. Nebylov, V.A. Nebylov // XII Vserossiyskoye soveshanie po problemam upravleniya VSPU-2014, Moskva, IPU RAN, 2014. s. 3391-3400.
7. Tomita, N., Nebylov, A.V. et al. Performance and Technological Feasibility of Rocket Powered HTHL-STO with Take-off Assist / N.Tomita, A.V. Nebylov. Acta Astronautica, 45, No.10, 1999. Pp. 629-637.
8. Nebylov, A.V.; Wilson, P.A. Ekranoplane - Controlled Flight Close to the Sea / A.V. Nebylov, P.A. Wilson. Southampton: WIT-press, UK, 2001. 236 p.
9. Nebylov, Alexander; Nebylov, Vladimir Metrology problems of WIG-craft motion control / Alexander Nebylov, Vladimir Nebylov // 5th International Workshop of Metrology in Aerospace (MetroAeroSpace), Rome, Italy, 2018. 6 p.
10. Nebylov, A.V., Nebylov, V.A. Rossiyskiye ekranoplany: novye perspektivy v mezhdunarodnom sotrudnichestve / A.V. Nebylov, V.A. Nebylov. M.: Russkiy inzhener. 2013. № 4. S. 33-36.
11. Nebylov, A.V. Problemy i metody sinteza avtopilota tyazhologo ekranoplana // A.V. Nebylov. SPb.: Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. 2011. № 2. S. 15-22.
12. Nebylov, A.V., Aerospace Sensors / A.V. Nebylov. N. Y.: Momentum Press., USA. 2012. 560 p.
13. Nebylov, A.V., Nebylov, V.A. Wing-in-Ground Effect Vehicles : Modern Concepts of Design and New Role of Automatic Control / A.V. Nebylov, V.A. Nebylov // 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS). EUCASS Association, 2009. Pp. 1-10.
14. Nebylov, A.V.; Watson, J. Aerospace Navigation Systems / A.V. Nebylov, J. Watson. London: John Wiley & Sons. Ltd, UK, 2016. 378 p.
15. Pereyaslov, A.N. The conceptual and practical bases for the use of ekranoplanes in EMERCOM of Russia / A.N. Pereyaslov. M.: Civil Security Technology. Vol.9, №2 (32), 2012. Pp.78-84.
16. TASS. Opytny obrazets ekranoplana s raketnym vooruzheniem sozhdadut v Rossii do 2027 goda. URL: <https://tass.ru/armiya-i-opk/5412967> (дата обращения 09.10.2018)
17. Nebylov, A.V. et al. Study of a Sea Launch Concept of Aerospace Shuttle with Heavy Class Ekranoplane as Takeoff and Landing Assist / A.V. Nebylov, E.A. Aframeev, N.P. Savichenko, N. Tomita, Y. Yoshida // 6th Intern. Symposium on Marine Engineering. The Marine Engineering Society of Japan, Tokyo, 2000. Pp. 744-750.
18. Polyakov A. Ekranoplan vozvrashaetsya. URL: <https://inosmi.ru/social/20171117/240785601.html> (дата обращения 09.10.2018)
19. Ganin, S. M. Sozdaniye ekranoplanov: ot proshlogo veka do nashich dney / S. M. Ganin. SPb.: Transport Rossiyskoy Federatsii, № 6 (55), 2014. S. 54-59.
20. Ekranoplan «Pelikan». URL: https://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2002/september/i_pw.html (дата обращения 09.10.2018)
21. Mylnikov R. v SSHA priznali opasnost rossiyskikh raketnyh ekranoplanov URL: <https://rg.ru/2018/07/31/v-ssha-priznali-opasnost-rossijskih-raketnyh-ekranoplanov.html> (дата обращения 19.11.2018).

УДК 629.5.004

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ВОДОИЗМЕЩАЮЩИХ СУДОВ НА ПЕРЕХОДЕ МОРЕМ

Дмитрий Алексеевич Скороходов

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13
тел. 8(812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru
профессор кафедры

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Валерий Юрьевич Каминский

кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13
тел.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Марин Любенов Маринов

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13
тел. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

Алексей Леонидович Стариченков

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5
тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Аннотация

В статье определены внутренние и внешние факторы управляемости судна и проанализировано их влияние на переходе морем. Рассмотрено движение судна в штормовых условиях и обозначены особенности управления при совершении маневров для исключения попадания судна в резонансный режим, приводящий к опрокидыванию. Перечислены особенности движения судна на мелководье и возможности автоматизации с целью повышения качества управления для исключения аварийных ситуаций. Проанализировано взаимодействие судов при движении на малых траверзных расстояниях, приводящее к возникновению поперечных гидродинамических сил, могущих привести к столкновению судов. Определены условия недопущения подобной ситуации. Рассмотрены особенности маневрирования одновинтового судна при различных начальных условиях. Показаны возможности маневрирования двухвинтового судна и судна с винтом регулируемого шага. Приведены способы торможения судна и показаны трудности ручного торможения в аварийных условиях. Изучены проблемы осуществления швартовных операций и постановки судна на якорь. Выработаны рекомендации по повышению управляемости судна в различных режимах.

Ключевые слова: судно, управляемость, фактор, режим, опрокидывание, аварийная ситуация, маневрирование, переход, торможение.

TRAFFIC CONTROL OF WATER-DISPLACEMENT VESSELS DURING A VOYAGE

Dmitry A. Skorokhodov

Dr.Sci.Tech, Professor of
the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St.
Petersburg, Vasilyevsky Island, 12 line, 13 tel. : 8 (812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru
Professor of the Department

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Electrotechnical
University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"), 197376,
Russia, St. Petersburg, Professora Popova Street, 5
tel. : +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

Valery Y. Kaminsky

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Laboratory of the Institute of Transport Problems
named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 12
line, 13

tel. : +7 (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy @ yandex.ru

Marin Lyubenov Marinov

PhD in Engineering Science, leading researcher of
the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences 199178, St.
Petersburg, Vasilyevsky Island, 12 line, 13 tel. : (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

Alexey L. Starichenkov

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department
St. Petersburg State Electrotechnical University

"LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)

197376, Russia, St. Petersburg, Professor Popov Street, 5
tel. : +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

Abstract

The article defines the internal and external factors of ship controllability and analyzes their influence in voyages. The motion of the vessel in stormy conditions is considered and the control peculiarities are indicated when performing maneuvers in order to exclude the vessel from entering the resonant mode, resulting in capsizing of a vessel. The features of a vessel's motion in shallow water and the possibilities of automation with the aim of improving the quality of control to eliminate emergencies are listed. The interaction of vessels when moving at small bow and beam bearings, leading to the occurrence of transverse hydrodynamic forces that could lead to a collision of vessels. The conditions for the prevention of such a situation are determined. The features of maneuvering single-screw vessel under different initial conditions are reviewed. The possibilities of maneuvering a twin-screw vessel and a vessel with an adjustable pitch propeller are shown. The methods of braking the vessel are given and the difficulties of manual braking in emergency conditions are shown. The problems of mooring operations and anchoring the vessel were studied. Recommendations were made to improve vessel's controllability in various modes.

Keywords: vessel, controllability, factor, mode, capsizing, emergency, maneuvering, voyage, braking.

Введение

Водоизмещающие суда распределяются по тоннажу в диапазоне от десятков до сотен тысяч тонн. Существенно различаются и их динамические характеристики, которые определяют особенности заданных алгоритмов системы управления движением (СУД), обеспечивающих управляемость судна. *Управляемость судна* – это способность сохранять устойчивость на курсе и обеспечивать его поворотливость [1]. Известно, что многие суда подвержены рыскливости и, для удержания их на курсе, требуется постоянное маневрирование рулем. На управляемость судна, кроме действий руля и движителей (гребные винты), оказывают влияние факторы, зависящие как от характеристик судна, так и от внешних причин [2]. К внутренним факторам относятся [3]: скорость (V), крен (θ), дифферент (ψ), длина (L), ширина (B), осадка (T), форма обводов подводной части корпуса, высота и форма надводного борта и надстроек, форма и размеры рулей.

К внешним факторам, влияющим на управляемость, относятся: курсовой угол к ветру (КУВт) и скорость ветра (V_B); курсовой угол к направлению движения волнения моря (КУВ) и сила волнения моря (высота волнения моря 3% обеспеченности $\left(\begin{matrix} h \\ 3\% \end{matrix} \right)$); глубина моря под килем судна; наличие течений и их направление; ограниченность водного пространства.

Проанализируем влияние на управляемость внутренних и внешних факторов [4, 5].

Скорость хода. Чем больше скорость хода, тем устойчивее на курсе и поворотливее судно.

Крен и дифферент судна. При отсутствии крена давление встречной воды на скулы судна распределяется симметрично, но во время крена оно становится неравномерным. Следовательно, при крене корабль будет стремиться отклониться от курса в сторону повышенного борта, испытывающего меньшее сопротивление встречной воды. При дифференте на нос судно теряет скорость и приобретает рыскливость. Дифферент на корму ухудшает поворотливость судна, затрудняя его перемещение рулем и винтами. Однако, при небольших значениях дифферента на корму, определенных для каждого судна, скорость хода может незначительно увеличиваться, а дифферент на нос улучшает поворотливость. Поэтому в открытом море необходимо создавать дифферент, сообщающий судну максимальную скорость хода, а при плавании в узкостях и ограниченной акватории дифферент должен обеспечивать наивысшую поворотливость.

Направление и сила ветра. Практика судовождения знает примеры, когда влияние ветра на управляемость судов определенного вида оказывает существенное, а в ряде случаев, решающее значение. Воздействие ветра на судно проявляется, главным образом, в возникновении крена и дрейфа, в изменении скорости движения и характеристик управляемости. Изменение скорости движения компенсируется увеличением или уменьшением мощности главных двигателей. Некоторые суда стремятся развернуться по ветру (уваливающиеся по ветру), а некоторые против ветра (приводящиеся к ветру).

Анализ литературы, затрагивающей особенности движения судов различного вида [6-8], показывает её направленность на рассмотрение, в основном, вопросов гидродинамики. В публикациях

[9-13] движение судна на переходе морем рассматривается комплексно, с учётом внутренних и внешних факторов влияющих на управляемость, а так же психофизиологических особенностей персонала судов. Подобный анализ позволяет оценить степень автоматизации управления судном в различных условиях.

1. Движение судна в штормовых условиях

При штормовом ветре основным фактором опасности плавания и маневрирования судна является качка и ветровой крен. Вследствие усиленной качки, зарывания в воду, других причин, обусловленных ветром и волнением, судно теряет возможность идти заданным курсом с оборотами винта, соответствующими нормальной эксплуатационной скорости. При этом для любого судна необходимо выбирать безопасные курс и скорость хода для чего, прежде всего, необходимо определить неблагоприятные характеристики (курс и скорость) соответствующие резонансному режиму бортовой или килевой качки. С этой целью необходимо оценить значения скорости хода и периода собственных колебаний судна. Кажущийся период волны определяется следующим образом [5]:

$$\tau = \frac{\lambda}{1,25\sqrt{\lambda} + 0,514V \sin \varphi_v}, \quad (1)$$

где:

λ - длина волны, φ_v – курсовой угол к волне,

V – скорость хода.

Кажущийся период волны можно менять, меняя скорость и курсовой угол к направлению распространения волн. Длина волны определяется по универсальной диаграмме качки в соответствии с параметрами текущей скорости и курсового угла к волне.

Период собственных колебаний судна определяется следующим образом:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_x + \Delta J_x}{Dh}}, \quad (2)$$

где: J_x - поперечный момент инерции масс судна, ΔJ_x - поперечный момент присоединенных масс судна, D - весовое водоизмещение судна, h - начальная поперечная метацентрическая высота.

В условиях плавания судна необходимые данные для расчетной оценки могут быть получены на основе универсальной диаграммы качки, заложенной в вычислительное устройство системы управления движением (СУД).

Поворот судна в штормовую погоду затруднён и чрезвычайно опасен. Под поворотом понимают изменение курса с переменной галса по отношению к волне. При выполнении поворота следует выбирать такую скорость, при которой судно не попадает в резонансную зону килевой или бортовой качки. Если при определённых значениях длины волны и периода собственных колебаний судна, резонансная зона охватывает весь возможный диапазон скоростей, то поворот против

волны выполнять нецелесообразно. Если длина волны не превосходит шестикратной осадки судна ($\lambda < 6T$), то при повороте против волны в момент перемены галса скорость может быть произвольной; при $6T < \lambda < 10T$ желательно, чтобы скорость при повороте судна была, возможно, большей, а при $\lambda > 20T$ – возможно меньшей, без потери управляемости.

При повороте по волне для исключения оголения и повреждения винта и руля на коротких волнах ($\lambda < 6T$) необходимо обеспечить либо самые малые скорости, либо скорости, превышающие 8-9 узлов; при очень длинных волнах скорости могут быть любые.

Участвующее в повороте или изменении курса судно некоторое время может находиться в условиях, близких к резонансу бортовой качки, а также проходить положение лагом к волне. Условия безопасного прохождения положения лагом к волне имеют вид:

$$\lambda \leq \frac{0,6B^2}{h}, \quad (3)$$

где: B – наибольшая ширина судна, h – поперечная метацентрическая высота.

2. Движение судна на мелководье

Влияние мелководья начинает проявляться с уменьшением глубин H до значений, определяемых по формуле Г.Е.Павленко [1]:

$$H \leq 4T + \frac{3V^2}{g}, \quad (4)$$

Наибольшее влияние мелководья сказывается тогда, когда отношение $\frac{H}{T} \leq 2$.

Степень влияния мелководья зависит от скорости, выраженной в виде числа Фруда, рассчитываемого по глубине $F_r = \frac{V}{\sqrt{gH}}$. При

$F_r \leq 0,3$ влияние мелководья на скорость и проседание корпуса незначительно для любых значений отношения $\frac{H}{T}$. Влияние мелководья

резко возрастает при $F_r \geq 0,8$ и достигает максимального значения при $F_r = 1,0$ т. е. при критической скорости:

$$V_{кр} = \sqrt{gH}. \quad (5)$$

При движении судна образуется гидродинамическое поле с переменным давлением. Под днищем давление понижено, что вызывает проседание судна, т.е. увеличение средней осадки по сравнению с осадкой неподвижного судна.

Увеличение осадки на мелководье для носа и кормы можно определить по следующей формуле :

$$\Delta T = 0,55 \cdot C_v \cdot C_\delta \left(\frac{H}{T} - 0,4 \right)^{-2} \cdot (H - T), \quad (6)$$

где: H – глубина воды, T – осадка носом или кормой при отсутствии хода, C_v – коэффициент, зависящий от скорости судна, C_δ – коэффициент, зависящий от формы корпуса,

$$C_v = 8 \left(\frac{V}{V_{кр}} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{V}{V_{кр}} - 0,5 \right)^4 + 0,0625 \right], \quad (7)$$

где: V – скорость судна,

$V_{кр}$ – критическая скорость для мелководья:

$$V_{кр} = 1,28 H^{0,625} \cdot \left(\frac{L}{TB} \right)^{0,125}. \quad (8)$$

$C_{\delta k} = 1,0$ - для кормы, а для носа:

$$C_{\delta n} = \frac{90 \delta^2 \cdot B}{L^2}, \quad (9)$$

где: $\delta = 0,45 - 0,65$ – коэффициент полноты водоизмещения.

Потеря скорости на мелководье может быть определена следующим образом:

$$\Delta V \% = 4,4 \frac{H}{T} - 34 \cdot \frac{V}{\sqrt{gH}}, \quad (10)$$

Потеря скорости определяется со знаком минус, если же получен положительный результат, потерю скорости считают равной нулю.

Мелководье существенно влияет на маневренные характеристики судна. Устойчивость на курсе по мелководью с ровным рельефом дна возрастает. При выполнении поворотов угловая скорость и угол дрейфа значительно меньше, чем на глубокой воде. Радиус циркуляции с

уменьшением глубины возрастает и для $\frac{H}{T} \approx 1,5$,

при прочих равных условиях, на 30% больше радиуса циркуляции на глубокой воде.

3. Движение судов на встречных курсах при движении в узкостях

Взаимодействие судов при движении на малых траверзных расстояниях, что возможно при их движении в узкостях, приводит к возникновению поперечных гидродинамических сил, направленных в сторону соседнего судна. В зависимости от взаимного положения судов действие поперечных сил может быть приложено к различным участкам корпуса со стороны внутреннего борта, образуя момент, вызывающий уклонение судов с заданного курса. При этом существуют различные схемы взаимодействия при обгоне и встречном движении. На особенности относительного движения влияют: соотношение водоизмещений, соотношение скоростей, расстояние между судами, осадка, наличие мелководья.

Критическая скорость для каналов может быть определена из соотношений:

$$V_{кр} = K \sqrt{gH}, \quad (11)$$

$$K = 0,226 \sqrt{n-1},$$

$$n = \frac{S_k}{S_\Theta},$$

где: S_k – площадь сечения канала, S_Θ – площадь мидель-шпангоута судна.

4. Маневрирование судна

Маневренные характеристики судна определяются его поворотливостью и инерционно-тормозными свойствами. Движение судна с переложением руля по криволинейной траектории характеризуется следующими параметрами: диаметром установившейся циркуляции (D_0), углом дрейфа (β), линейной скоростью (V), угловой скоростью на циркуляции (ω), периодом циркуляции (T_u).

Период циркуляции можно определить следующим образом

$$T_u = \frac{\pi D_0}{30,8V}. \quad (12)$$

Время поворота (T_γ) на заданный угол (γ) определяется из выражения:

$$T_\gamma = \frac{T_u \cdot \gamma}{360}. \quad (13)$$

Тактический диаметр (D_u) (расстояние между диаметральной плоскостью судна на прямом курсе и положением его при повороте на 180°) можно приближенно вычислить по эмпирической формуле:

$$\text{в балласте } D_u = 0,263 \cdot L \cdot \left(\frac{C_\delta \cdot B}{L} \right)^{-1,14}; \quad (14)$$

$$\text{в грузу } D_u = 0,353 \cdot L \cdot \left(\frac{C_\delta \cdot B}{L} \right)^{-1,08}, \quad (15)$$

где: C_δ - коэффициент полноты водоизмещения.

Приближенная зависимость диаметра установившейся циркуляции от угла перекадки руля может быть выражена формулой:

$$D = 6,1\delta^{-0,509} \cdot D_{ц}, \quad (16)$$

где $D_{ц}$ - тактический диаметр циркуляции при положении руля $\delta = 35^\circ$.

Динамический угол крена, возникающий при резком повороте в первый момент, может превосходить угол, установившийся на циркуляции в 1,5 – 2 раза. Поэтому судам с малой метацентрической высотой следует избегать резких выходов на циркуляцию на полном ходу.

Входными данными для системы управления движением (СУД) при маневрировании с помощью руля являются: скорость судна, угол перекадки руля, способ поворота, состояние судна (в грузу, порожнем). При этом реализуются следующие алгоритмы поворота: руль перекадывается на борт, скорость хода не меняется. Скорость снижается до минимальной, руль перекадывается на борт, скорость хода увеличивается.

Выходными данными будут: период циркуляции, линейная скорость на циркуляции, диаметр установившейся циркуляции, время поворота в минутах на заданный угол, тактический диаметр циркуляции, скорость хода после поворота, угловая скорость поворота на установившейся циркуляции, зависимость диаметра циркуляции от угла клады руля, линейное значение форштевня от линии циркуляции в сторону поворота, линейное значение смещения кормы в сторону, противоположную повороту, ширина полосы, занимаемая корпусом судна во время поворота, угол крена на циркуляции в сторону, противоположную циркуляции.

5. Особенности управления гребным винтом

Если бы гребной винт работал независимо от судна, то благодаря симметричной форме и однородности окружающей жидкости результирующие усилия от лопастей винта были бы направлены вдоль оси вращения. В действительности винт работает во взаимодействии с рулём и корпусом судна. И хотя симметрия гребного винта не нарушается, поле скоростей и плотность потока воды, окружающей винт, не остаются однородными. Лопасти, вращаясь в таком потоке в разных положениях, испытывают разновеликие усилия, отчего результирующая сила упора лопастей отклоняется от оси винта. Эту силу можно разложить на составляющие: продольную (T_3), направленную

вдоль оси вращения винта, поперечную (T_n), перпендикулярную оси вращения. Первая называется силой упора и придает судну поступательное движение, вторая - боковая сила - стремится уклонить судно с прямолинейного пути.

От боковых сил избавиться нельзя, однако, их можно использовать при маневрировании. Нередко, когда судно имеет небольшое поступательное движение (малый ход до 3-5 узлов; руль неэффективен) поперечная составляющая силы упора винта может оказаться решающим фактором, определяющим успех маневра.

Различные сочетания режимов работы главного двигателя вызывают определенные комбинации боковых сил гребного винта. Знание этих комбинаций позволяет использовать боковые силы для улучшения маневренных качеств судна.

При этом могут быть следующие начальные условия: судно стоит, судно имеет передний ход, судно имеет задний ход, судно имеет один винт правого вращения.

Виды боковых сил, возникающих на винте: b – сила попутного потока; всегда направлена в сторону, противоположную вращению винта и проявляется на переднем установившемся ходу; c – боковая сила набрасывания струи; максимально проявляется на переднем установившемся ходу, вызывая, как и сила b , уклонение кормы в сторону, противоположную вращению винта. Судно с винтом правого шага при движении вперед под действием сил c и b стремится уклониться по ходу вправо; D – сила реакции винта наиболее ощутима в начале движения судна, вызывает уклонение кормы в сторону вращения винта. Рассмотрим движение судна при различных начальных условиях.

Передний ход со «стопа», когда $c < D$. Попутный поток отсутствует. Под действием результирующей силы R судно приобретает движение и уклоняется влево, так как корма уходит вправо.

Перемена хода с заднего на передний. Исходное положение: судно движется задним ходом. Стопорят машину и дают передний ход. Судно по инерции идет задним ходом; b – отсутствует; $c < D$. Корма уклоняется вправо.

Передний установившийся ход. $c + b > D$. Корма уклоняется влево, поэтому судно по ходу уклоняется вправо.

Задний ход со «стопа». Корма значительно уклоняется влево. Руль не влияет на управляемость.

Задний установившийся ход. Корма резко уклоняется влево. Силы c и D направлены в одну сторону.

Перемена хода с переднего на задний ход. Исходное положение – машина работает на передний ход. Стопорят машину и дают задний ход. Судно по инерции продолжает двигаться вперед.

Силы c и D действуют в одну сторону и уклоняют корму влево. Однако если инерция переднего хода значительна, а влияние попутного потока сохраняется, может произойти внезапное уклонение судна по ходу влево. Отсюда правило: корма всегда поворачивается в сторону вращения гребного винта при отсутствии спутного потока.

Особенности управления двухвинтовым судном. При одновременной работе двух винтов с одинаковой частотой вращения, влияние боковых сил отсутствует как на переднем, так и на заднем ходу. Повороты только с помощью рулевого устройства имеют идентичную циркуляцию вправо и влево. Если для разворота судна используется одновременно руль и двигатель, то диаметр циркуляции может быть значительно уменьшен.

Поворот с помощью одного винта. Винт создает вращающий момент:

$$M_c = T_v \cdot \frac{l}{2}, \quad (17)$$

где: T_v - упор винта, $\frac{l}{2}$ - расстояние от линии вала до диаметральной плоскости судна.

Разворот с помощью двух винтов «враздрай», т.е. один винт работает вперед, а другой назад. В этом случае разворачивающий момент определяется по формуле:

$$M = M_l + M_n = (T_{vl} + T_{vn}) \cdot \frac{l}{2}, \quad (18)$$

где: M_l и M_n - разворачивающие моменты левого и правого винтов, T_{vl} и T_{vn} - силы упора левого и правого винтов.

Винт регулируемого шага (ВРШ) позволяет повысить КПД двигателя на режимах, отличных от расчетного. ВРШ создает значительно больший упор и момент по сравнению с винтом фиксированного шага (ВФШ) на малом ходу и, особенно при работе на задний ход, что на 40-50% сокращает время и длину тормозного пути.

6. Торможение судна

Входными данными при определении особенностей торможения судна являются: m - масса судна, V - скорость судна, D - водоизмещение судна, $P = mV \approx 1,1DV$ - количество движения.

Путь и время разгона судна определяются следующим образом.

Путь разгона:

$$S = 0,37tV. \quad (20)$$

Время разгона:

$$t = C_1 \frac{DVnd}{N}. \quad (21)$$

где: n - частота вращения гребного винта, d - диаметр гребного винта, N - мощность двигателя,

H - шаг винта, C_1 - коэффициент, зависящий от отношения $\frac{H}{d}$.

Путь и время торможения судна можно определить по следующим формулам.

Путь торможения:

$$S = 0,26tV. \quad (22)$$

Время торможения:

$$t_1 = C_2 \frac{DVn'd}{N'}, \quad (23)$$

где: N', n' - мощность и частота вращения гребного винта на режимах заднего хода.

Эффективность торможения в значительной мере определяется временем увеличения частоты вращения гребного винта на задний ход от нуля до номинального значения. Чем быстрее частота вращения на заднем ходу достигает максимальной величины, тем больше средняя сила упора винта за время активного торможения и тем меньше тормозной путь.

Практика показала [3], что для крупнотоннажных судов при экстренном торможении, особенно если скорость судна значительна, в дополнение к упору винта полезно использовать силы гидродинамического сопротивления. Для их возникновения необходимо резкое уклонение судна от заданного курса. Поэтому торможение подобным способом возможно при условии достаточного пространства чистой воды. При этом руль перекадывается на борт, а после разворота на обратный курс машину стопорят и дают задний ход.

Экспериментально установлено, что при подобном маневре у судна водоизмещением 225 000 т на полном ходу вперед (16 узлов) после разворота на обратный курс, скорость падает до 6 узлов. В этот момент машина стопорится и даётся полный задний ход. Работа задним ходом до завершения разворота может привести к потере контроля движения судна, его уходу с траектории циркуляции и удлинению тормозного пути. Снижение хода за счет циркуляции позволяет остановить судно с выбегом вперед по курсу на 3-4 корпуса.

Экстренное торможение судна с помощью руля осуществляется по следующему алгоритму. Руль перекадывается на левый борт, после того как судно отклонится от первоначального курса на 20° , двигатель переводят на средний ход вперед. После отклонения судна на $40-50^\circ$, руль переводят на правый борт и дают малый ход. После возвращения судна на первоначальный курс руль снова переводят на левый борт и снижают ход до самого малого вперед. Судно продолжает уклоняться вправо, затем постепенно возвращается на начальный курс. Руль перекадывают на правый борт и дают полный ход назад. После прекращения движения судна относительно воды стопорят двигатель.

Для объективной характеристики тормозных качеств различных типов судов и оценки, в этом

смысле, эффективности комплекса «двигатель - движитель», в качестве критерия целесообразно использовать отношение действительного тормозного пути S_T к условному тормозному пути

$S_{ус}$, которое называется показателем тормозного пути. Условный тормозной путь, отражает ситуацию, при которой гребной винт на заднем ходу, в течение всего времени торможения, развивает силу упора, соответствующую полной мощности двигателя.

7. Швартовные операции судна

Швартовные операции в море являются ответственным и непростым маневром, на качественное выполнение которого влияют: тип судна, размеры, крен, дифферент, курс, скорость, сила и направление ветра, высота и направление волн, сила и направление течения.

При швартовке к судну, лежащему в дрейфе, необходимо учитывать следующие обстоятельства. При правом шаге винта целесообразно швартоваться левым бортом. Необходимо подходить на минимальной скорости, обеспечивающей управляемость судна. При траверсном расстоянии в носу 20-30 м выполняется задний ход и движение останавливают.

При швартовке к судну, имеющему ход, необходимо учитывать, что судно, к которому необходимо швартоваться (пассивное), должно идти против волны с КУВ 20-30°. Швартующееся судно должно подходить к пассивному судну параллельным галсом на расстояние 1 кабельтов и уравнивать скорость хода. Сближение судов осуществляется постепенным уклонением швартующегося судна в сторону пассивного судна. При сближении носовой части судна до 20-50 м с носовой частью пассивного судна подается линь и закрепляются швартовные концы. Швартующееся судно уменьшает свой ход и с помощью руля сближается с пассивным судном.

При швартовке к судну, стоящему на якоре, учитывается, что швартовка выполняется всегда с кормы против ветра и течения. При этом необходимо оценивать амплитуду рыскания, стоящего на якоре судна. Подход также осуществляется под углом 20-30° минимальным ходом, обеспечивающим управляемость судна. При сближении до 15-20 м подают линь и дают задний ход для погашения инерции. При закреплении носового швартова дают задний ход, благодаря чему корма подводится к пассивному судну.

При швартовке судна в порту выполняют следующие подготовительные операции. На карте отмечают путь следования, определяют глубины, препятствия, точки поворота, глубину у причала. Определяют силу и направление ветра, направление и скорость приливно-отливных течений. Проверяют осадку носом и кормой.

При швартовке бортом судно подходит носом к причалу на минимальной скорости. После подачи носового швартова подтягивают нос судна к стенке и подают с носа второй швартов. Затем

перекладывают руль на борт, противоположный швартовке и дают малый ход вперед. При этом корма уклоняется к причалу.

При швартовке кормой предварительно отдают якоря, повернув судно кормой к причалу. Оба якоря должны быть отданы на одной линии, параллельной к причалу. Дают машине задний ход и травят якорные цепи до подхода кормы к причалу. Останавливают машину и подают кормовые швартовы.

8. Постановка судна на якорь

Входными данными СУД для определения места постановки судна на якорь являются: глубина, защищенность от ветра, размеры места якорной стоянки, наличие и характеристики приливно-отливных течений (направление, скорость, колебание уровня), рельеф дна, характер грунта, близость навигационных опасностей, наличие навигационных ориентиров, состояние и прогноз погоды.

Размер якорной стоянки (радиус) определяется по следующей формуле [3]:

$$R = \sqrt{l^2 - (H')^2} + L + \Delta R, \quad (23)$$

где: l - необходимая длина якорного каната; H' - высота якорного клюза над грунтом; L - длина судна; ΔR - запас якорной цепи.

Безопасная глубина стоянки определяется следующим образом:

$$H = 1,2T + 0,7h_{\frac{\sigma}{6}}, \quad (24)$$

где: T - наибольшая осадка судна; $h_{\frac{\sigma}{6}}$ - вероятная высота волны.

Надежность стоянки зависит от количества вытравленной цепи: чем ее больше, тем ближе к горизонтальному положению, будет направление тяги, тем больше трение о грунт и меньше раскачивание якоря.

Заключение

1. Показано влияние внутренних (скорость хода, крен, дифферент судна) и внешних факторов (глубина моря, направление и сила ветра, волнение моря), и необходимость их учёта при управлении движением судна на переходе морем.

2. Рассмотрено движение судна в штормовых условиях и показано, что безопасное маневрирование целесообразно осуществлять с применением средств автоматизации, позволяющих упростить принятие решений персоналом, особенно при проходе судном положения «лагом к волне». При повороте судна по волне во избежание оголения и повреждения винта и руля на коротких волнах к моменту перемены галса надо иметь либо самые малые скорости, необходимые для обеспечения поворотливости, либо скорости, превышающие 8-9 узлов. При очень длинных волнах скорости могут быть любые.

3. Мелководье существенно влияет на маневренные характеристики судна. Устойчивость по курсу на мелководье с ровным рельефом дна возрастает. При выполнении поворотов угловая скорость и угол дрейфа значительно меньше, чем

на глубокой воде. Радиус циркуляции с уменьшением глубины возрастает и, при $H/T \approx 1,5$, при прочих равных условиях становится на 30% больше радиуса циркуляции на глубокой воде. При движении судна на мелководье настоятельной необходимостью является автоматизация процесса определения максимальной скорости судна для исключения касания днищем грунта.

4. Взаимодействие судов при движении на малых траверзных расстояниях, которое обычно случается при их движении в узкостях, приводит к возникновению поперечных гидродинамических сил, направленных в сторону другого судна. При этом существуют различные схемы взаимодействия при обгоне и встречном движении. На особенности относительного движения судов влияют: соотношение водоизмещений, соотношение скоростей, расстояние между судами, осадка, наличие мелководья. Указанные обстоятельства определяют необходимость обеспечения подобного взаимодействия судов либо в автоматическом режиме, либо системой информационной поддержки.

5. Маневренные характеристики судна определяются его поворотливостью и инерционно-тормозными свойствами. Динамический угол крена, появляющийся в первый момент при резком повороте, может превосходить установившийся на циркуляции в 1,5 – 2 раза. Поэтому судам с малой метацентрической высотой следует избегать резких выходов на циркуляцию на полном ходу. Т.о. входными данными для системы управления движением (СУД) при маневрировании с помощью

руля являются: скорость судна, угол перекадки руля, способ поворота, состояние судна (в грузу, порожнее).

6. Различные сочетания режимов работы главного двигателя вызывают определенные комбинации боковых сил гребного винта. Знание этих комбинаций позволяет использовать боковые силы для улучшения маневренных качеств судна. Рассматриваются начальные условия: судно стоит, судно имеет передний ход, судно имеет задний ход, судно имеет один винт правого вращения. Конкретные условия определяют специфику представления информации об особенностях движения судна.

7. Эффективность торможения в значительной мере определяется временем увеличения частоты вращения гребного винта на задний ход от нуля до номинала. Чем быстрее частота вращения на заднем ходу достигает максимального значения, тем больше средняя сила упора винта за время активного торможения и тем меньше будет тормозной путь. Экстренное торможение с помощью руля практически невозможно осуществить в ручном управлении. В тоже время этот вариант торможения легко реализуется современными системами управления движением.

Для правильного и эффективного осуществления швартовых операций необходимо создание информационной поддержки персонала судна. Входная информация может быть реализована в автоматическом режиме и частично в ручном.

Литература

1. Басин А.И. Ходкость и управляемость судна. М.: Транспорт, 1967. 255 с.
2. Ермолаев Г.Г., Зотеев Е.С. Основы морского судовождения. М.: Транспорт, 1988. 258 с.
3. Третьяк А.Г., Козырь Л.А. Практика управления морским судном. М.: Транспорт, 1988. 112 с.
4. Бородай Н.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. Л.: Судостроение, 1967. 432 с.
5. Ремез Ю.В. О выборе курса и скорости судна при шторме. М.: Транспорт, 1957. 48 с.
6. Jung-Hun Kim, Jung-Eun Choi, Bong-Jun Choi, Seok-Ho Chung, Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 3, September 2014, Pages 715-722, ISSN 2092-6782.
7. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 2, June 2014, Pages 323-332, ISSN 2092-6782.
8. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 364-374, ISSN 2092-6782.
9. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. №1(39). С.185-195.
10. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Королёв О.А. Информационная система поддержки принятия решения при борьбе за живучесть судна // В сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. 2018. С. 93-99.
11. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. №1(39). С.209-215.
12. Круглеевский В.Н., Маринов М.Л., Скороходов Д.А. Информационно-аксиологические аспекты автоматизации контроля пожарной опасности на морских и речных судах // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 2. №2(40). С.137-142.
13. Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н., Каминский В.Ю. Моделирование действий специалистов водного транспорта методом профессионально-аксиологического анализа механизмов принятия решений // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. №3(41). С.183-189.

References

1. Basin A.I. Hodkost' i upravlyaemost' sudna. M. Transport, 1967. 255 p.
2. Ermolaev G.G., Zoteev E.S. Osnovy morskogo sudovozhdeniya. M. Transport, 1988. 258 p.
3. Tret'yak A.G., Kozyr' L.A. Praktika upravleniya morskim sudnom. M. Transport, 1988. 112 p.
4. Borodaj N.K., Necvetaev YU.A. Kachka sudov na morskome volnenii. L. Sudostroenie, 1967. 432 p.
5. Remez YU.V. O vybore kursa i skorosti sudna pri shtorme. M. Transport, 1957. 48 p.
6. Jung-Hun Kim, Jung-Eun Choi, Bong-Jun Choi, Seok-Ho Chung, Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 3, September 2014, Pages 715-722, ISSN 2092-6782.
7. Christopher S. Chaney, Konstantin I. Matveev, Modeling of steady motion and vertical-plane dynamics of a tunnel hull, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 6, Issue 2, June 2014, Pages 323-332, ISSN 2092-6782.
8. Sung-Soo Kim, Soon-Dong Kim, Donghoon Kang, JongHyun Lee, Seung Jae Lee, Kwang Hyo Jung, Study on variation in ship's forward speed under regular waves depending on rudder controller, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 7, Issue 2, March 2015, Pages 364-374, ISSN 2092-6782.
9. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. №1(39). pp.185-195.
10. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Korolyov O.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri bor'be za zhivuchest' sudna. V sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnyh trans-portnyh sistem. Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBUN Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN . 2018. pp. 93-99.
11. Kaminsky V.YU., Marinov M.L., Skorohodov D.A. Metodika uchyota professional'no-cennostnogo aspekta dejstvij sudovoditelya vo vremya trenazhyornoj podgotovki. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. №1(39). pp.209-215.
12. Krugleevsky V.N., Marinov M.L., Skorohodov D.A. Informacionno-aksiologicheskie aspekty avto-matizacii kontrolya pozharnoj opasnosti na morskikh i rechnykh sudah. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 2. №2(40). pp.137-142.
13. Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N., Kaminsky V.YU. Modelirovanie dejstvij specia-listov vodnogo transporta metodom professional'no-aksiologicheskogo analiza mekhanizmov pri-nyatiya reshenij. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T. 1. №3(41). pp.183-189.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 62-9

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ВОЛНЫ
В ВОЛНОВОМ БАСЕЙНЕ****Василий Игоревич Маслов**

Магистр техники и технологии

Инженер отделения гидроаэродинамики

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

196158, г. Санкт-Петербург, Московское ш. 44

e-mail: doc128@yandex.ru

Аннотация

Аномальная волна (волна-убийца) отличается от ветровых волн необычайно крутым передним склоном и пологой ложбиной. Кроме того, аномальная волна не описывается спектральной теорией волн. Волна-убийца так внезапно возникает и стремительно обрушивается, что вызывает повреждения морских объектов и приводит к фатальным последствиям для судов. С целью оценки воздействия волны-убийцы на объекты необходимо физическое моделирование.

В работе представлены предварительные результаты физического моделирования аномальной волны в волновом бассейне Крыловского государственного научного центра. Описан физический эксперимент и рассмотрены полученные параметры аномальной волны.

Физическое моделирование осуществлялось методом суперпозиции регулярных волн разной частоты и переменной крутизны. Для создания управляющего сигнала формировались волновые пакеты, состоящие из последовательности определенного количества гармоник с заданными параметрами.

В эксперименте проводилась суперпозиция от двух до четырех регулярных волн переменной крутизны с частотами в диапазоне 3-6 рад/с. Проведен анализ результата моделирования волны-убийцы, полученной в условиях регулярного волнения. Определено, что в волновом бассейне Крыловского государственного научного центра возможно генерирование аномальной волны методом суперпозиции.

Ключевые слова: аномальная волна, волна-убийца, экстремальная волна, физическое моделирование, волновой бассейн.

PHYSICAL MODELING OF ABNORMAL WAVE IN A WAVE BASIN**Vasilii I. Maslov**

Master of engineering and technology

Engineer of the aerohydrodynamics department

Krylov state research center

Moscow Highway 44, St. Petersburg 196158, Russian Federation

e-mail: doc128@yandex.ru

Abstract

The abnormal wave (killer wave) differs from the wind waves by an unusually steep front slope and a gentle trough. In addition, the abnormal wave is not described by the spectral wave theory. The killer wave appears so suddenly and collapses rapidly that it causes damage to marine objects and leads to fatal consequences for ships. In order to assess the impact of the killer wave on objects, physical modeling is necessary.

Preliminary physical modeling results of abnormal wave in a wave basin of the Krylov state research center are presented. The physical experiment is described and the obtained parameters of abnormal wave are considered.

Physical modeling was carried out by the superposition method of regular waves with different frequencies and variable steepness. To create a control signal wave packets were formed, consisting of a sequence of a certain number of harmonics with specified parameters.

In experiment was carried out the superposition from two to four regular waves of variable steepness with frequencies in the range of 3-6 rad/s. The analysis of the simulated killer wave, obtained in regular sea state, is carried out. It is determined that in a wave basin of the Krylov state research center it is possible to generate the abnormal wave by the superposition method.

Key words: abnormal wave, freak wave, rogue wave, extreme wave, physical modeling, wave basin.

Введение

В океанологии принято считать, что аномальная волна (так называемая «волна-убийца») это огромная, внезапно возникающая в океане волна. Аномальная волна (АВ) характеризуется необычайно крутым передним склоном и очень пологой

ложбиной. Такая волна не может быть описана с помощью математического аппарата спектральной теории волн. Волна-убийца характеризуется набором определенных параметров, которые определяют ее отличие от обычных ветровых волн. Такими параметрами являются: высота волны от

ложбины до вершины, высота гребня, крутизна, высоты соседних волн, наличие глубокой ложбины. Известно, что высота аномальной волны может достигать 28 м [1]. По форме, принимаемой перед обрушением, АВ подобна разрушающимся ветровым волнам предельной крутизны [2].

Встреча судна с такой волной может закончиться трагически как для самого судна, так и для его экипажа. В результате мощного воздействия обрушающегося гребня волны-убийцы на оборудование верхней палубы и корпус, судно, как правило, получает существенные повреждения, ведущие к образованию трещин и течи. В случае, если судно оказывается в положении, близком к лаговому, воздействие аномальной волны может оказаться фатальным – судно переворачивается, отрезая для экипажа пути спасения.

Последние десятилетия ведутся интенсивные наблюдения за аномальными волнами, измеряются и анализируются данные натурных исследований, развиваются теории по выявлению причин появления аномальных волн в мировом океане. К настоящему времени определено, что основными факторами возникновения аномальной волны являются: течение, рельеф дна, ветер, неустойчивость волнового поля, самофокусировка и модуляция волн.

Известные теоретические исследования воздействия аномальной волны на плавучее сооружение, в основном, ограничиваются получением качественных результатов [3;4]. На сегодняшний день для количественной оценки, по-видимому, на достигнутом уровне изучения волны-убийцы физическое моделирование процесса взаимодействия волны-убийцы с плавучим объектом является более продуктивным методом исследования с точки зрения решения прикладных судостроительных задач. Такой подход уже применен, например, в волновых бассейнах

Берлинского технического университета [5], Норвежского технологического института Marintek [6] и в голландском бассейне MARIN [7]. К сожалению, технология генерирования аномальной волны в отечественных волновых бассейнах, имеющих отношение к судостроению, судя по отсутствию какой-либо информации в печатных и электронных изданиях, до сих пор не освоена.

Эксперимент и анализ

В рамках выполняемых исследований физическое моделирование аномальной волны осуществлялось в волновом бассейне Крыловского государственного научного центра (длина 90 м, ширина 20 м, глубина 4 м). Генерация АВ производилась методом суперпозиции регулярных волн переменной крутизны одного направления. Для образования регулярных волн использовался электромеханический волнопродуктор, в качестве волнообразующего тела использующий щиты, совершающие угловые перемещения вдоль бассейна относительно оси, совпадающей с их нижними кромками. Для создания управляющего сигнала щитами волнопродуктора при помощи специально разработанного программного обеспечения формировались волновые пакеты. Каждый волновой пакет состоял из последовательности определенного числа гармоник заданной частоты и длительности.

Для регистрации образующейся аномальной волны использовались 5 струнных волнографов электролитического типа, установленных с определенным шагом (рисунок 1). Калибровка волнографов производилась в диапазоне $\pm 0,250$ м. Частота дискретизации измеряемого сигнала составляла 20 Гц. Погрешность измерения высот волн составила $\pm 2,4$ мм.

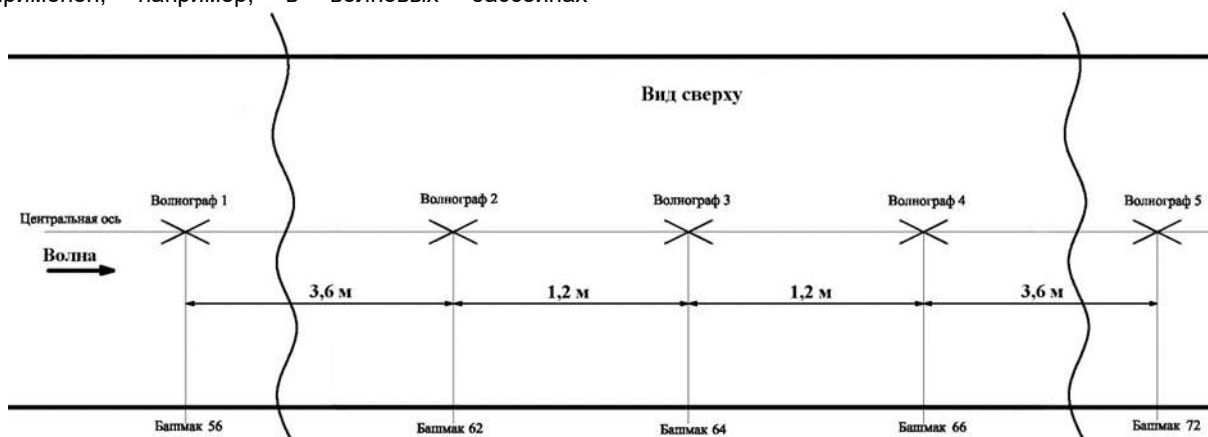


Рисунок 1. Расположение волнографов в волновом бассейне

В соответствии с теоретическими расчетами точка фокусировки складываемых двумерных регулярных волн определялась расстоянием примерно 45 м от волнопродуктора. Выбранное количество и местоположение волнографов обусловлено тем, что точка фокусировки может смещаться в зависимости от количества волн в волновом пакете и их высот, а также нелинейных эффектов взаимодействия волн.

Нелинейность проявляется в смещении точки фокусировки во времени и пространстве относительно расчетного положения, в различии АВ по высоте и ее обрушению, в появлении вертикальной асимметрии гребня [8].

Тем не менее, точка фокусировки по длине бассейна при определенном наборе частот и высот складываемых волн, как показали наблюдения, имеет неизменное положение, более точно определяемое эмпирически, чем теоретически, поскольку каждый волновой бассейн имеет свои

конструктивные особенности, которые сложно учесть при теоретическом исследовании. волн разной частоты, но одинаковой амплитуды. Частотный диапазон складываемых регулярных волн составил от 3 до 6 рад/с. При этом частота каждой последующей волны в пакете была меньше предыдущей и в определенной точке происходило их наложение, так как скорость волны обратно пропорциональна частоте и, соответственно, более длинные волны догоняют короткие. Наилучший

В процессе выполненного эксперимента производилось сложение от 2-х до 4-х регулярных результат получен при сложении 4-х регулярных волн высотой 100 мм. Фактическое расположение точки фокусировки оказалось весьма близким к теоретическому положению. На рисунке 2 приведена запись реализации, демонстрирующая схождение 4-х волн в точке фокусировки, примерно через 87 с после начала генерации волнения. Виден процесс конвергенции и дивергенции регулярных волн.

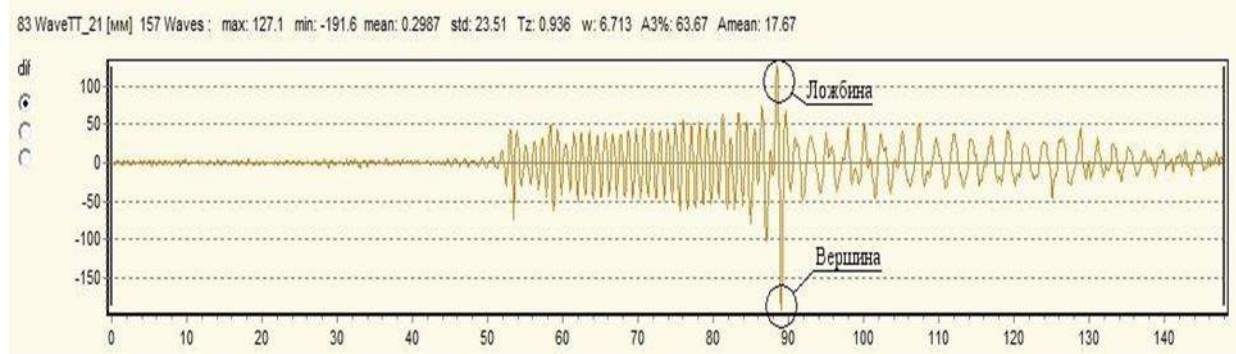


Рисунок 2. Реализация процесса генерации АВ

Процесс возникновения и обрушения аномальной волны с образованием атакующего гребня в эксперименте длился не более 3 секунд. Высота аномальной волны (от ложбины до вершины) составила 319 мм, высота гребня 192 мм, период 1,2 с, длина 2,25 м, а крутизна 1/7 (рисунок 3). В предположении, что наибольшая инструментально зафиксированная высота натурной аномальной волны составляет 28 м, данный модельный результат соответствует масштабу 1:88.

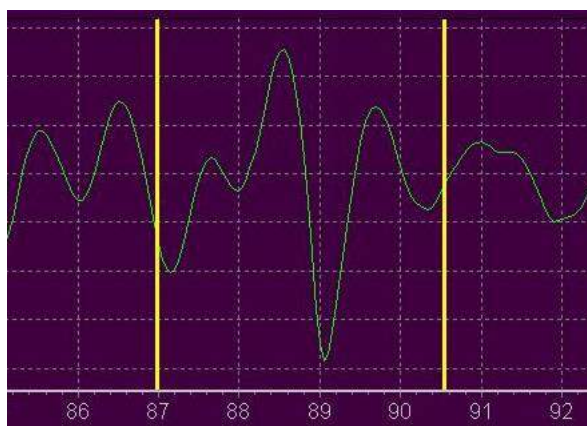


Рисунок 3. Увеличенное изображение АВ на реализации процесс

Заключение

Таким образом, определено, что в волновом бассейне КГНЦ, возможно генерирование АВ с применением метода суперпозиции. В последующих экспериментах планируется определить предел по достижимой высоте аномальной волны в бассейне и, как следствие, оценить диапазон масштабов моделирования ее воздействия на плавучие объекты. На последующих этапах работы будет реализовываться генерация АВ в условиях нерегулярного волнения.

Благодарности

Выражаю благодарность за помощь в проведении эксперимента коллективу лаборатории мореходности и, особенно, ведущему научному сотруднику Живице С.Г. за ценные замечания и ведущему инженеру Савельеву А.П. за помощь в разработке программного обеспечения.

Литература

1. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение. Учеб. пособие. 2-е изд., доп. СПб.: ВВМ, 2012. 165 с.
2. Пашин В.М., Рахманин Н.Н. Проблема аномальных волн и необходимость ее учета при проектировании объектов морской техники // Научно-технический и производственный журнал «Судостроение». 2005. №5. С. 9-16.
3. Дорожко В.М. Динамическое воздействие волны-убийцы на контур морского судна // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2015. Том 16. №3. С. 209-216.
4. Clauss F.G. et al. Non-Linear Calculation of Tailored Wave trains for Experimental Investigations of Extreme Structure Behaviour // Proceedings of OMAE04 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2004. 9 p.
5. Clauss F.G., Klein M. The New Year Wave in a Seakeeping Basin: Generation, Propagation, Kinematics and Dynamics // Ocean Engineering. 2011. Vol. 38. PP. 1624-1639.

6. *Luxmoore J. et al.* Experimental Investigation of Nonlinear Wave Interactions, Wave Turbulence and Rogue Waves // Proceedings of the HYDRALAB IV Joint User Meeting. Lisbon. 2014. 5 p.
7. *Hennig J., Schmittner E.C.* Optimization of Short-Crested Deterministic Wave Sequences VIA a Phase-Amplitude Iteration Scheme // Proceedings of the ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE. 2012. 9 p.
8. *Hennig J., Schmittner E.C.* Experimental Variation of Focusing Wave Groups for the Investigation of Their Predictability // Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2009. 11 p.

References

1. *Lopatuhin L.I.* Vetrovoe volnenie. Ucheb. posobie. 2-e izd., dop. SPb.: VVM, 2012. 165 s.
2. *Pashin V.M., Rahmanin N.N.* Problema anomal'nyh voln i neobhodimost' ee ucheta pri proektirovanii ob#ektov morskoy tehniki. Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Sudostroenie». 2005. №5. S. 9-16.
3. *Dorozhko V.M.* Dinamicheskoe vozdejstvie volny-ubijcy na kontur morskogo sudna. Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie. 2015. Tom 16. №3. S. 209-216.
4. *Clauss F.G. et al.* Non-Linear Calculation of Tailored Wave trains for Experimental Investigations of Extreme Structure Behaviour. Proceedings of OMAE04 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2004. 9 p.
5. *Clauss F.G., Klein M.* The New Year Wave in a Seakeeping Basin: Generation, Propagation, Kinematics and Dynamics. Ocean Engineering. 2011. Vol. 38. PP. 1624-1639.
6. *Luxmoore J. et al.* Experimental Investigation of Nonlinear Wave Interactions, Wave Turbulence and Rogue Waves. Proceedings of the HYDRALAB IV Joint User Meeting. Lisbon. 2014. 5 p.
7. *Hennig J., Schmittner E.C.* Optimization of Short-Crested Deterministic Wave Sequences VIA a Phase-Amplitude Iteration Scheme. Proceedings of the ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE. 2012. 9 p.
8. *Hennig J., Schmittner E.C.* Experimental Variation of Focusing Wave Groups for the Investigation of Their Predictability. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2009. 11 p.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.12.001.57

К АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДНЕТОННАЖНЫХ НАЛИВНЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ НА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**Тхань Ван Зьонг**

аспирант кафедры кораблестроения ФГБОУ ВО
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: duongvthanh@gmail.com

Владимир Павлович Иванов

доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения ФГБОУ ВО
Калининградский государственный технический университет,
236000, Калининград, Советский пр., 1,
e-mail: dtn.ivanov@yandex.ru

Аннотация

С использованием математической модели эксплуатации рыболовного судна выполнены сопоставительные расчетные оценки экономической эффективности для ряда среднетоннажных рыболовных наливных судов (НРС) при их использовании в заданных технико-экономических условиях (ТЭУ) эксплуатации с конкретизацией удаленности района промысла, сроков хранения охлажденного улова, стоимостных параметров и пр. при вариациях показателя продуктивности района промысла. Полученные данные позволили для заданных ТЭУ эксплуатации выделить наиболее эффективные суда с последующим их использованием в качестве судов-претендентов для задач пополнения флота и/или в качестве судов-прототипов для задач оптимизационного проектирования НРС. Проведенный статистический анализ сопоставительных расчетов позволил выявить значимость и характер влияния величины водоизмещения судна, его энерговооруженности и показателя продуктивности района промысла на эффективность НРС. Полученные результаты рассматриваются как шаги в теоретическом осмыслении концепции и характерных особенностей современных НРС и в разработке математической модели для их оптимизационного проектирования.

Ключевые слова: рыболовные суда наливного типа (НРС), водоизмещение, энерговооруженность, технико-экономические условия (ТЭУ), модель эксплуатации, экономическая экспертиза, статистический анализ, пополнение флота, суда-претенденты, отбор.

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE CHARACTERISTICS OF MEDIUM RANGE BULK FISHING CARRIERS ON THEIR EFFICIENCY**Thanh Van Duong**

Postgraduate Student, Department of Shipbuilding of FSBEI of Higher Education
Kaliningrad State Technical University
236000, Kaliningrad, Sovetskiy pr., 1 e-mail: duongvthanh@gmail.com

Vladimir P. Ivanov

Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Shipbuilding of FSBEI of Higher Education
Kaliningrad State Technical University
236000, Kaliningrad, Sovetskiy pr., 1, e-mail:
e-mail: dtn.ivanov@yandex.ru

Abstract

Using a mathematical model of fishing vessel operation, comparative calculated estimates of the economic efficiency for a number of medium-range bulk fishing vessels were made, while using them in the specified technical and economic conditions of operation specifying the remoteness of the fishing area, shelf life of the cooled catch, cost parameters and other with variations in the indicator of the area of fishing productivity. The obtained data allowed selecting the most efficient vessels for the given technical and economic conditions of operation, followed by their use as contenders for fleet replenishment tasks and / or as prototype ships for bulk fishing vessels optimization design tasks. The statistical analysis of comparative calculations revealed the significance and nature of the influence of the vessel's displacement, its power capacity and productivity indicator of the area of the fishery on the effectiveness of bulk fishing vessels. The results are viewed as steps in the theoretical understanding of the concept and characteristics of modern bulk fishing vessels, and in the development of a mathematical model for their optimization design.

Keywords: bulk fishing vessels, displacement, power capacity, technical and economic conditions, operating model, economic expertise, statistical analysis, fleet replenishment, vessels-contenders.

Введение

Рыболовные суда наливного типа (НРС) получили свое развитие и широкое распространение в ряде стран с развитым рыболовством в течение двух-трех последних десяти-летий. Особенности этих судов, отмеченные в [1] в части используемого способа сохранения и транспортировки улова, а также их энерговооруженности и характеристик формы обводов, определяют их как отдельную характерную категорию эффективных рыболовных судов и необходимость выполнения соответствующих исследований и обобщений для задач их проектирования, и пополнения рыболовного флота в целом.

Для поиска лучших проектных и инвестиционных решений посредством целенаправленного технико-экономического анализа (ТЭА) характеристик судна, методология оптимизационного проектирования НРС (см. [2]) предполагает аргументированный расчетный отбор (из числа действующих судов или их проектов) тех судов, которые в заданных технико-экономических условиях (ТЭУ) их эксплуатации наиболее эффективны. В данной работе приводятся расчетные оценки эффективности эксплуатации ряда НРС (с выделением наиболее эффективных судов для заданных ТЭУ) и последующий анализ

влияния основных характеристик НРС на их эффективность.

1. Особенности выполненных расчетов

Расчеты эффективности проведены для 11 среднетоннажных НРС при автономной форме организации их промысла. Примеры в целом традиционной компоновки НРС приведены на рис.1 и 2. Диапазон характеристик судов составил по их длине $L_p=23.6...60$ м, по водоизмещению $D=600...3600$ т, по мощности главных двигателей $Ngd=1000...4000$ кВт, по грузоемкости $Wgr=200...1700$ м³. Рис.3 свидетельствует о значительном разбросе данных НРС по их энерговооруженности $\eta_{gd}=Ngd/D$ с общей тенденцией ее уменьшения при росте водоизмещения. Соответственно значительный разброс имеют и значения коэффициента утилизации водоизмещения НРС по их грузоподъемности $\eta_{gr}=Pgr/D$ (рис.4) с традиционным трендом роста его значений при росте D . Отметим также прогресс, достигнутый в области судовой энергетики и отражаемый для современных НРС в части значимого уменьшения относительных объемов, занимаемых их машинным отделением (по данным [1] - более чем вдвое). При этом сохраняется тенденция уменьшения значений η_{gr} с ростом значений η_{gd} (см. рис. 5).

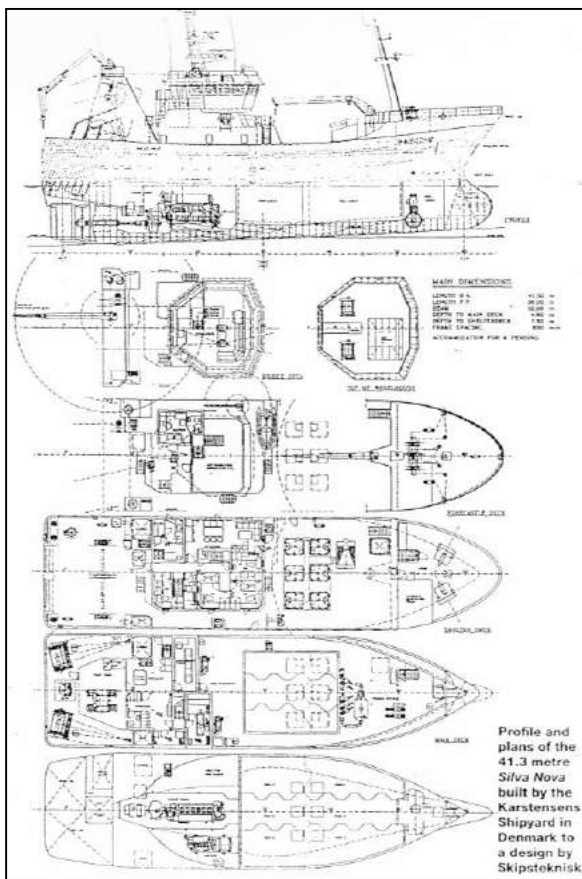


Рис.1. НРС Silva Nova (D=1460 т, Ngd=2469 кВт)

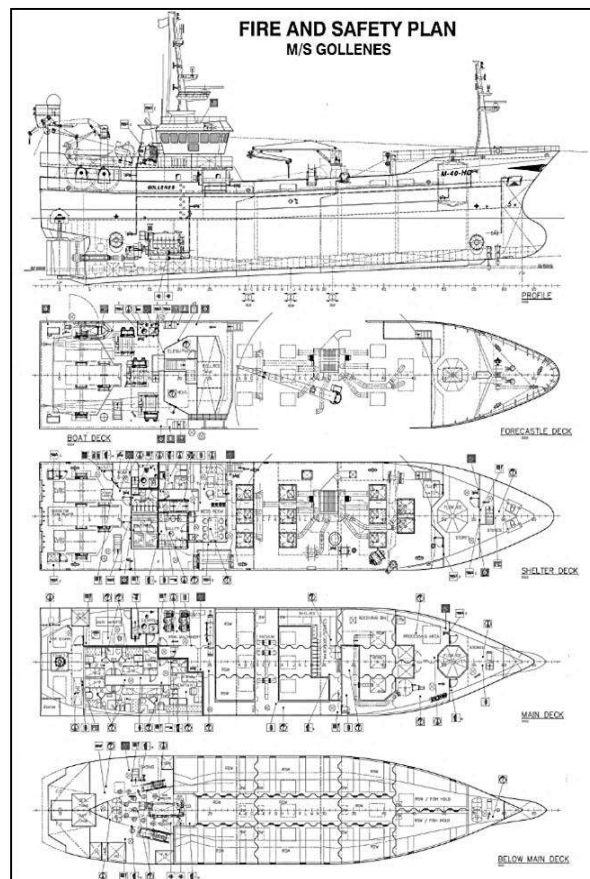


Рис.2. НРС Clipperton (D=2052 т, Ngd=2031 кВт)

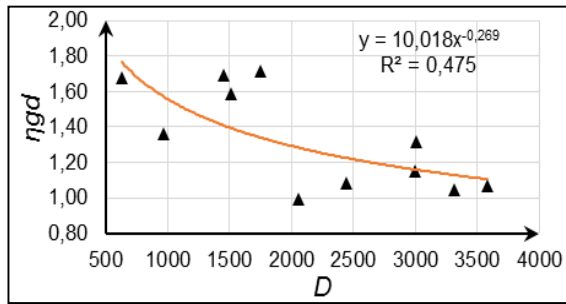


Рис.3. Значения $\eta_{gd}=f(D)$

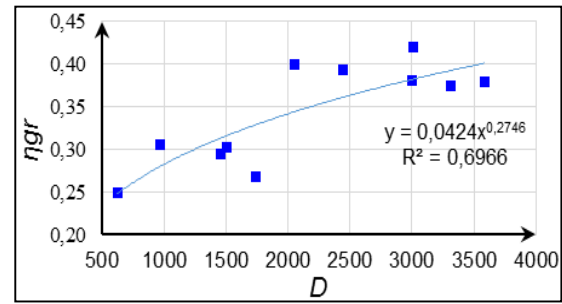


Рис.4. Значения $\eta_{gr}=f(D)$

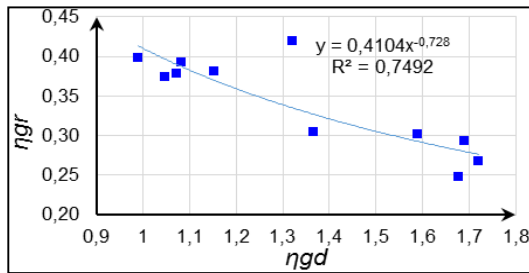


Рис. 5. Значения $\eta_{gr}=f(\eta_{gd})$

Расчеты эффективности выполнялись с использованием модели эксплуатации рыболовного судна (МЭРС, см. [3]), модифицированной для НРС. С учетом опыта эксплуатации наливных судов в порт кондиционный улов, удаленность района промысла от порта базирования принята близкой к среднесуточному переходу (250 миль). Расчетное время хранения рыбы (от поступления первого улова до разгрузки судна в порту) принято $T_{хр} = 5$ сут. Оценка значений среднесуточного вылова определялась выражением $P_{ул} = K_{прс} \cdot K_{sb} \cdot N_{gd}$, т. При этом коэффициент промысловой системы $K_{прс}$ для всех рассмотренных (современных) НРС принят равным 1, а значение коэффициента сырьевой базы района промысла варьировалось в диапазоне $K_{sb} = 0,02 \dots 0,14$ с шагом 0,02.

В качестве аргументов анализа рассматривались абсолютные значения основных элементов судна (D и N_{gd}) и его относительная характеристика $\eta_{gd} = N_{gd}/D$ (коэффициент энерговооруженности НРС). Показателем эффективности НРС принята эффективность капиталовложений $F_{kap} = (Q_{gr} - C_{sr})/S_{kr}$, где Q_{gr} и C_{sr} – значения производительности и эксплуатационных затрат судна за промысловый рейс в их денежном исчислении, S_{kr} – его стоимость, отнесенная ко времени рейса.

2. Результаты выполненных расчетов и их анализ

Примеры расчетных оценок эффективности эксплуатации рассмотренных судов в заданных ТЭУ при значениях $K_{sb} = 0,04$ и $0,08$ представлены на рис. 6. Приведенные данные отражают следующее:

1. очевидное большое влияние продуктивности сырьевой базы района промысла (значений K_{sb}) на величину показателя эффективности НРС F_{kap} ,
2. наличие оптимальных значений водоизмещения судна D^* для соответствующих значений K_{sb} : $F_{kap} \rightarrow \max = f(K_{sb})$,

3. тенденцию роста оптимальных значений D^* с ростом значений K_{sb} (в данном примере $D^* \sim 1500$ т при $K_{sb} = 0,04$ и $D^* \sim 2000$ т при $K_{sb} = 0,08$).

Из рассмотренных судов на относительно бедной сырьевой базе ($K_{sb} = 0,04$) наиболее эффективным ($F_{kap} = 33\%$) оказывается НРС *Silva Nova* (рис. 1), а при более высоком ее показателе ($K_{sb} = 0,08$) - НРС «*Clipperton*» (рис. 2, $F_{kap} = 109\%$). При этом отметим, что выделенные суда характерны значимой разницей в значениях коэффициентов их энерговооруженности ($\eta_{gd} = 1,69$ и $0,99$) и, соответственно, утилизации по грузоподъемности ($\eta_{gr} = 0,29$ и $0,40$).

При анализе определенный интерес представляют также значения Q_{gr} , C_{sr} и S_{kr} , приходящиеся на 1 тонну водоизмещения судна: $\eta_{Qgr} = Q_{gr}/D$, $\eta_{Csr} = C_{sr}/D$ и $\eta_{Skr} = S_{kr}/D$. Пример регрессий, полученных для $K_{sb} = 0,08$, представлен на рис. 7. Он показывают, что рост водоизмещения судна приводит к снижению значений его относительной стоимости η_{Skr} и относительных эксплуатационных затрат η_{Csr} . При этом у значений относительной производительности судна $\eta_{Qgr} = f(D)$ (равно как и у основного критерия эффективности $F_{kap} = f(D)$) прослеживается свой максимум.

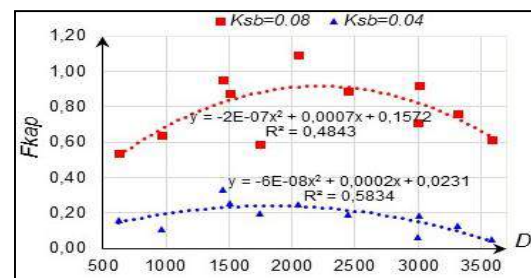


Рис. 6. $F_{kap}=f(D)$ при $K_{sb}=0,04$ и $0,08$

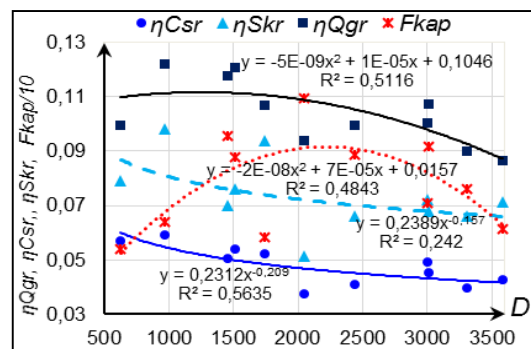


Рис.7 η_{Qgr} , η_{Csr} , η_{Skr} , $F_{kap} = f(D)$ при $K_{sb} = 0,08$

Характер влияния абсолютных характеристик D и Ngd на эффективность HPC ($Fkap=f(D)$ и $Fkap=f(Ngd)$) при вариациях Ksb отражается параболическими регрессиями (рис. 8-9), а относительной характеристикой (энерговооруженности ngd , т.е. $Fkap=f(ngd)$) - линейными регрессиями (рис. 10). Для

интерпретации полученных результатов полезны также графики, построенные с использованием регрессионных трендов рис. 8-10 при вариациях значений аргументов. Наиболее содержательными из них оказываются графики $Fkap=f(Ksb)$ при $ngd=var$, приведенные на рис. 11.

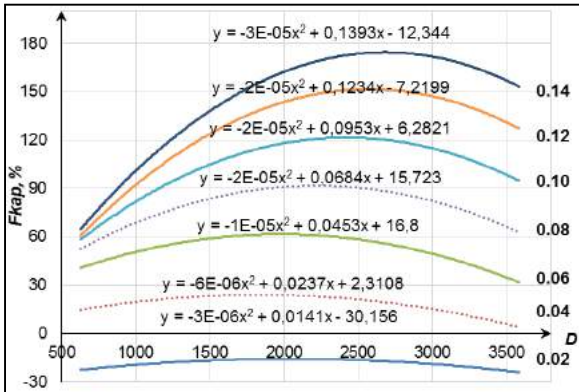


Рис. 8. $Fkap=f(D)$ при $Ksb=var$

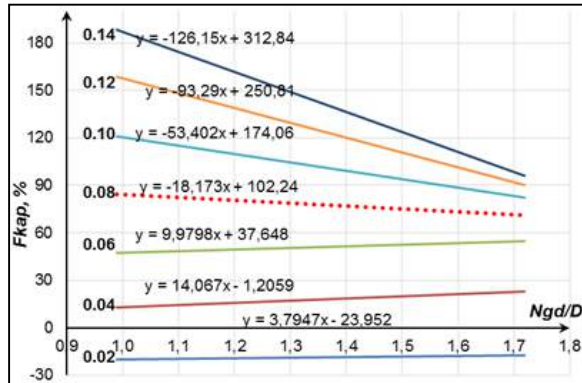


Рис. 10. $Fkap=f(ngd)$ при $Ksb=var$

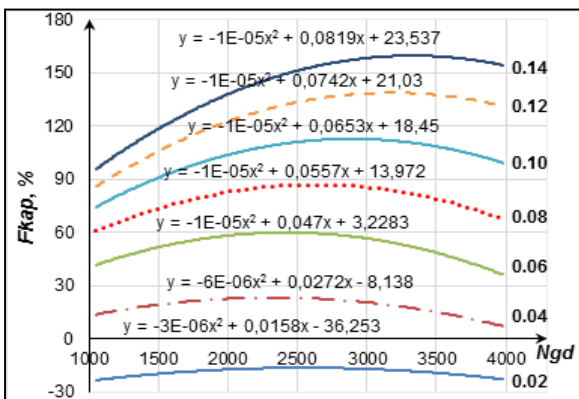


Рис. 9. $Fkap=f(Ngd)$ при $Ksb=var$

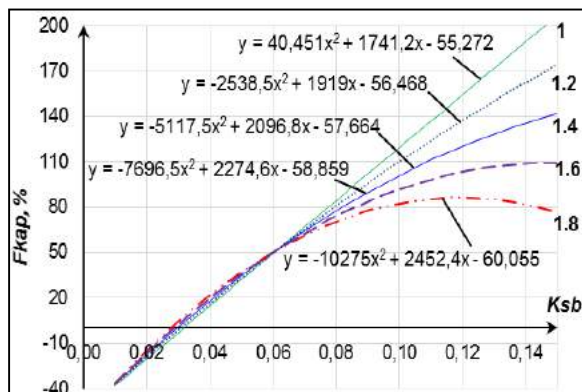


Рис. 11. $Fkap=f(Ksb)$ при $Ngd/D=var$

Представленные материалы позволяют дополнить и уточнить ранее представленные выводы анализа, поскольку свидетельствуют о следующем:

1. Графики на рис. 8-9 показывают экономическую целесообразность увеличения D и Ngd до их определенных значений, соответствующих максимумам $Fkap$, разных для разных значений Ksb . Дальнейший рост D и Ngd приводит к снижению показателя эффективности, что обусловлено избыточными значениями этих характеристик. При этом:

1.1. Избыточное значение D (а, следовательно, и его грузоподъемности) при малых значениях Ngd и Ksb (т.е. при низких значениях промысловой производительности HPC) предопределяет неполную загрузку рыбных танков судна, что вызвано принятым ограниченным сроком хранения охлажденной рыбы. Значения коэффициента загрузки судна $Kzagr=f(Ksb)$ ($Kzagr \leq 1$) отслежены в ходе выполнения эксплуатационных расчетов для HPC разного водоизмещения ($D=var$) и аппроксимированы регрессиями, представленными на рис. 12.

1.2. Избыточное значение Ngd (особенно при высоких значениях Ksb и малых значениях D) обуславливает высокую промысловую

производительность HPC и, как следствие, досрочное (до истечения принятого срока хранения улова) заполнение рыбных танков судна ($Kzagr=1$). Это приводит к сокращению доли рейса, приходящейся на лов, что, как известно, негативно сказывается на эффективности судна.

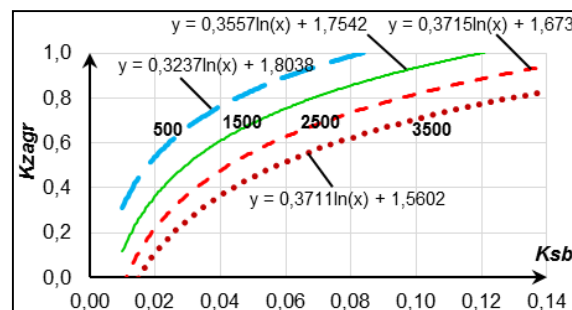


Рис. 12. $Kzagr=f(Ksb)$ при $D=var$

2. О влиянии сырьевой базы (Ksb) и энерговооруженности HPC (ngd) на его эффективность:

2.1. Регрессии рис. 10 подтверждают и для HPC ранее отмечавшийся вывод, что повышение эффективности рыболовных траулеров в условиях

ухудшения продуктивности сырьевой базы предполагает повышение их энерговооруженности. По результатам выполненных трендовых оценок при $K_{sb}=0,04$ изменение значения в диапазоне $\eta_{gd}=1,0\dots1,8$ приводит к значимому изменению критерия эффективности на $\Delta F_{kap}=10\dots15\%$.

2.2. При богатой сырьевой базе наивысшая эффективность судна достигается при более низких значениях коэффициента η_{gd} , определяемых по результатам оптимизационных исследований. При этом увеличение значений η_{gd} приводит к неоправданному росту эксплуатационных затрат и, соответственно, к снижению эффективности *НРС* (см. рис. 10 и п. 1.2).

2.3. Существует некоторая область значений K_{sb} , при которой отклонение энерговооруженности судна от ее оптимальных значений практически не влияет на его эффективность. В данном анализе (при заданном комплексе ТЭУ эксплуатации *НРС*) эта область соответствует значениям $K_{sb}\sim 0,06$.

2.4. Существует некоторое пороговое значение K_{sb} , ниже которого промысел на *НРС* становится убыточным. В данном анализе это соответствует значениям $K_{sb}\sim 0,03$. Это, в частности, означает, что для *НРС* в рассмотренном диапазоне водоизмещений ($D=600\dots3600$ т) не следует ожидать положительной эффективности промысла, если среднесуточные выловы будут менее 30 т при $N_{gd}=1000$ кВт или 60 т при $N_{gd}=2000$ кВт.

Заключение

К наиболее общим выводам проведенного анализа отнесем следующее:

С учетом значимого влияния коэффициента K_{sb} на основные характеристики *НРС* (D и N_{gd}) и его эффективность, для решения задач пополнения флота *НРС* для заданного района промысла показана безусловная необходимость:

1. практического знания и/или соответствующих исследований продуктивности района промысла с оценкой величины ожидаемого вылова, приходящегося на единицу промыслового усилия (тяги судна и/или мощности его главного двигателя), а также допустимых сроков хранения улова, рациональных мест базирования судов и пр.,

2. расчетной экономической экспертизы (см. [3]) действующих *НРС* или их проектов для уточненных (п.3.1) ТЭУ их эксплуатации с выделением из них наиболее эффективных судов. Тех судов, которые в последующем целесообразно использовать в качестве претендентов для пополнения рыболовного флота и/или в качестве прототипов для задач оптимизационного проектирования или модернизации (см. [2, 4]).

Полученные результаты анализа рассматриваются как шаги в теоретическом осмыслении концепции и характерных особенностей современных *НРС* и в разработке математической модели для их оптимизационного проектирования.

Литература

1. Иванов В.П. Анализ характеристик современных малотоннажных и наливных рыболовных судов для задач их проектирования. / В.П. Иванов, Дудин С.Д., Зыонг В.Т.; - СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2017, №3(37), т.1, с. 48-56.
2. Зыонг В.Т., Иванов В.П. Об использовании среднетоннажных наливных рыболовных судов для морского рыболовства СРВ. / Т.В. Зыонг, В.П. Иванов; - СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2018, №3(41), т.1, с. 104-110.
3. Иванов В.П. Математическое моделирование эксплуатации современного рыболовного судна при освоении его улова. / В.П. Иванов, Дудин С.Д., Курдюков С.Г.; - СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3(33), т.2, с. 62-66.
4. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учебник: /В.П. Иванов - Калининград: БГАРФ, 2010. – 275с.

References

1. Ivanov V.P. Analiz harakteristik sovremennyh malotonnazhnyh i nalivnyh rybolovnyh sudov dlya zadach ih proektirovaniya. Ivanov V.P., Dudin S.D., Duong V.T.; SPb: Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2017, №3(37), t.1, pp. 48-56.
2. Duong V.T. Ob ispol'zovanii srednetonnazhnyh nalivnyh rybolovnyh sudov dlya mor-skogo rybolovstva SRV. Ivanov V.P., Duong T.V.; SPb: Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, №3(41), t.1, pp. 104-110.
3. Ivanov V.P. Matematicheskoe modelirovanie ehkspluatatsii sovremennogo rybolovnogo sudna pri osvoenii ego ulova. Ivanov V.P., Dudin S.D., Kurdyukov S.G.; SPb: Morskie intellektual'nye tekhnolo-gii, 2016, №3(33), t.2, pp. 62-66.
4. Ivanov V.P. Tekhniko-ehkonomicheskie osnovy sozdaniya rybolovnyh sudov. Uchebnik; Kaliningrad: BGARF, 2010. 275p.

УДК 629.576

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ КРЫЛА И ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОПЕРЕНИЯ ЭКРАНОПЛАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ

Евгений Михайлович Грамузов

доцент, доктор технических наук, профессор
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
e-mail: terkog@nntu.ru

Виктор Иванович Любимов

профессор, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д.5а
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Андрей Владимирович Февральских

кандидат технических наук, ведущий инженер по гидрогазодинамике
ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс»
111672, Москва, ул. Суздальская, д. 46, офис 203
e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Кирилл Вадимович Смирнов

главный конструктор
ООО «Опытно-конструкторское бюро по экранопланам RDC Aqualines»
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Советская, д.12
e-mail: smirnov-kirill@inbox.ru

Александр Викторович Соснов

инженер-конструктор
ООО «Опытно-конструкторское бюро по экранопланам RDC Aqualines»
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Советская, д.12
e-mail: sosnov-aleksandr@mail.ru

Аннотация

Исследуются возможности современного программного обеспечения CAE/CAD (Computer Aided Engineering / Computer Aided Design) с поддержкой инструментов численного моделирования гидрогазодинамики для выполнения исследований в ходе концептуального проектирования экраноплана. Развитие вычислительных технологий концептуального проектирования и их применение в создании судна рассматривается как часть трансформации научно-технической парадигмы XXI века. Представлены результаты разработки и апробации методики автоматизированного оптимизационного расчета системы «крыло + горизонтальное оперение» под действием экранного эффекта. Методика включает автоматизацию как процессов передачи данных, так и запуска типичных этапов численного моделирования гидрогазодинамики: построение геометрической модели, дискретизацию моделируемого пространства, численное решение уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с привлечением модели турбулентности Ментора, а также обработку результатов вычислений. По результатам непрерывной серии вычислительных экспериментов, выполненных в автоматизированном режиме, определены коэффициенты подъемной силы и момента тангажа, которые использованы для оценки продольной устойчивости движения экраноплана по критерию Иродова; представлены зависимости координат аэродинамических фокусов от параметров установки крыла и горизонтального оперения. Результаты численных экспериментов для более чем ста двадцати расчетных случаев с использованием ЭВМ в распространенной современной конфигурации получены по истечению четырех часов непрерывных вычислений без вмешательства пользователя. Разработка и апробация методики выполнена с использованием программного обеспечения ANSYS Workbench. Результаты вычислений по разработанной методике сопоставлены с ранее полученными данными по экранной аэродинамике и результатами испытаний буксируемой модели экраноплана. Выявлен ряд закономерностей изменения положений аэродинамических фокусов при варьировании параметров компоновки: установочных углов крыла и горизонтального оперения, плеча и высоты установки оперения. По результатам работы предложена серия рекомендаций для дальнейшего проектирования.

Ключевые слова: численное моделирование аэродинамики, автоматизированная оптимизация, концептуальное проектирование, экраноплан; ANSYS.

AUTOMATED OPTIMIZATION OF THE WING AND CANARD CONFIGURATION OF THE GROUND EFFECT VEHICLE BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL AERODYNAMIC MODELING

Evgeny M. Gramuzov

Associate Professor, Dr.Sci.Tech, professor
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseeva
603950, Nizhny Novgorod, Minina, 24
e-mail: terkor@nntu.ru

Viktor I. Lyubimov

Professor, Dr.Sci.Tech,
FSBEI of Higher Education "Volga State University of Water Transport"
603950, Nizhniy Novgorod, st. Nesterova, 5a
e-mail: pts@vgavt-nn.ru

Andrey V. Fevralskikh

Ph.D., leading engineer in fluid dynamics
CJSC "CADFEM C-I-S"
111672, Moscow, Suzdalskaya, 46, office 203
e-mail: a.fevralskih@gmail.com

Kirill V. Smirnov

Chief designer

LLC "Experimental Design Bureau for WIG RDC Aqualines" Russia, 603000, Nizhny Novgorod, st. Sovetskaya, 12 e-mail: smirnov-kirill@inbox.ru

Alexander V. Sosnov

design engineer

LLC "Experimental Design Bureau for WIG RDC Aqualines" Russia, 603000, Nizhny Novgorod, st. Sovetskaya, 12 e-mail: sosnov-aleksandr@mail.ru

Abstract

The possibilities of modern software CAE / CAD (Computer Aided Engineering / Computer Aided Design) with the support of numerical modeling tools of fluid dynamics for research in the course of conceptual design of a ground-effect vehicle are being studied. The development of computational technologies of conceptual design and their application in designing a vessel is considered as part of the transformation of the scientific and technical paradigm of the 21st century. The results of the development and testing of the automated optimization calculation of the "wing + canard" system under the influence of the ground effect are presented. The methodology includes the automation of both processes - data transfer and initiation of standard stages of numerical modeling of fluid dynamics: designing a geometric model, discretization of the modeled space, numerical solution of the Navier-Stokes equations averaged over Reynolds, using the Mentor turbulence model, and processing the results of calculations. According to the results of a continuous series of computational experiments performed in an automated mode, the lift coefficients and moment of pitch were determined, which were used to assess the longitudinal stability of a ground-effect vehicle motion by the criterion of Irodov; dependencies of aerodynamic centers coordinates on the parameters of the wing and canard incidences are presented. The results of numerical experiments for more than one hundred and twenty computational cases using a computer in a common modern configuration were obtained after four hours of continuous calculations without user intervention. The development and testing of the methodology was carried out using the ANSYS Workbench software. The results of calculations according to the developed method are compared with the previously obtained data on ground aerodynamics and the results of tests of the towed model of a ground effect vehicle. A number of regularities in changing the positions of aerodynamic centers have been revealed when varying the configuration parameters: wing and canard pitch angles, arm and incidence of canard. According to the results, a series of recommendations for further design was proposed.

Keywords: numerical modeling of aerodynamics, automated optimization, conceptual design, ground-effect vehicle; ANSYS.

Введение

Историю промышленных революций наглядно иллюстрирует последовательность развития подходов к созданию судна. В ретроспективе этот процесс представлен в работе [1], в трех этапах (таблица 1). Каждый этап характеризуется возникновением новых технологий и методов, появление которых обусловлено накоплением научно-технического знания и приводит к перераспределению труда между инженерами-конструкторами, исследователями и

программистами. Существует концепция, согласно которой на современной стадии наиболее передовые по уровню научно-технического развития страны (к которым, безусловно, относится и Россия) входят в новый этап – так называемую «четвертую промышленную революцию» [2] (по Э. Тоффлеру – «третья волна» [3]). На этом этапе перед техническими науками возникают принципиально новые задачи: учитывать возрастающую роль системности в проектировании техники, а также максимально использовать в работе возможности, предоставляемые математическим моделированием

[4]. В работе [5] показано, что платформой для решения этих задач в кораблестроении становятся современные компьютерные технологии, которые служат базой для развития концептуального

проектирования как отдельного, самостоятельного и независимого вида творческой деятельности в процессе создания судов.

Таблица 1

Этапы промышленных революций на примере развития подходов к созданию судна

Этап	До XVIII в.	XVIII – 1-я пол. XIX в	2-я пол. XIX – XX в.
Новые методические подходы	Конструирование	Проектирование	Исследование
Технологии мышления	Воссоздание конструкции в чертеже	Разработка проекта, предусматривающего разделение труда в процессе воплощения проекта (производства)	В процесс разработки проекта включаются исследования (например, испытания модели в опытовом бассейне)
Технология использования рабочей силы	Применение рабочей силы без существенного разделения по специальностям	Разделение труда по специальностям	Частичная автоматизация исследований и производства

На практике эта тенденция в течении последнего десятилетия проявляется в деятельности малых инновационных предприятий. Принимая аддитивные технологии, технологии компактного производства (например, 3D печать), а также компьютерные технологии автоматизации и систематизации проектирования, использующие методы численного моделирования, в качестве основных инструментов разработки проекта, появляются малые фирмы и конструкторские бюро, которые предлагают новые концепции скоростных судов. Краткое описание характерных примеров деятельности таких предприятий представлено в таблице 2. В основе приведенных примеров концептуальных проектов судов заложены известные способы динамического поддержания – гидродинамическое крыло, воздушная подушка, экраный эффект. Однако за счет использования новых подходов к проектированию и конструированию значительно сокращаются сроки разработки и воплощения проектов, что позволяет говорить о переходе скоростного судостроения на новый этап развития.

В частности, известно, что применение технологий численного моделирования в разработке концептуального проекта и аэрогидродинамической компоновки скоростного судна в ряде случаев оказывается значительно более быстрым и дешевым способом получения достоверной информации для принятия проектных решений, чем выполнение исследований с моделями в аэродинамических трубах и опытовых бассейнах [6]. Кроме того, в ряде работ на примерах

- анализа подходов к разработке аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой [7];

- численного моделирования аэрогидродинамики амфибийных судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа [8];

- численного исследования гибких ограждений амфибийных судов на воздушной подушке с учетом аэрогидроупругих эффектов [9]

показано, что возможности инструментов программного обеспечения автоматизированного проектирования по своей информативности значительно превышают возможности экспериментов с физическими моделями. Таким образом, актуальность исследования возможностей программного обеспечения для выполнения концептуального проектирования судов сохраняется.

Применение CAE/CAD систем в исследовании устойчивости аэродинамики экранопланов

Экраноплан – судно с аэродинамическим поддержанием, использующее эффект увеличения подъемной силы, действующей на аэродинамическое крыло вблизи подлежащей (водной) поверхности. Применение критериев оценки продольной статической устойчивости крейсерского движения экраноплана [10] включают определение координат точек приложения дополнительной подъемной силы (аэродинамических фокусов), возникающей при изменении положения судна в пространстве по высоте относительно экранирующей поверхности и тангажу.

Таблица 2

Примеры деятельности малых инновационных предприятий в судостроении

Компания	Концепция	Применяемые инновации	Достижение
<p>ООО СК «Аэроход», Россия</p> 	<p>Гибрид судна на воздушной подушке и экраноплана (проект «Тунгус»)</p>	<p>Численное моделирование аэрогидродинамики и напряженно-деформированного состояния корпуса, разработка материалов ограждения воздушной подушки</p>	<p>В течение трех лет (2013 – 2015 г.г.) проработан ряд вариантов аэрогидродинамической компоновки, на основе выбранного варианта построена самоходная модель, которая прошла испытания.</p>
<p>Advanced Aerodynamic Vessels, Франция</p> 	<p>Катамаран – «летающее крыло»</p>	<p>Численное моделирование аэрогидродинамики, композитные материалы корпуса.</p>	<p>За четыре года (2013 – 2016 г.г.) выполнено проектирование и постройка опытного образца, постройка натурного судна и введение его в эксплуатацию на пассажирских перевозках вдоль Атлантического побережья Франции.</p>
<p>Candela Speed Boat, Швеция</p> 	<p>Скоростной катер с глубоко погруженными гидродинамическим и крыльями</p>	<p>Композитные материалы корпуса, альтернативный источник энергии (электродвигатель), автоматизированное проектирование.</p>	<p>В течение четырех лет (2015 – 2018 г.г.) разработан проект, построен и испытан полномасштабный прототип, начата разработка и строительство модернизированного варианта.</p>

По Иродову [10], координаты аэродинамического фокуса по высоте \bar{X}_{F_h} и аэродинамического фокуса по углу атаки \bar{X}_{F_α} , а также координата положения центра тяжести \bar{X}_T , определенные в долях хорды крыла в направлении от носа к корме экраноплана, обладающего продольной статической устойчивостью, удовлетворяют соотношениям:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{F_h} - \bar{X}_{F_\alpha} < 0 \\ \bar{X}_T - \bar{X}_{F_\alpha} < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{X}_{F_h} = \frac{\partial m_z / \partial \bar{h}}{\partial c_y / \partial \bar{h}}$; $\bar{X}_{F_\alpha} = \frac{\partial m_z / \partial \alpha}{\partial c_y / \partial \alpha}$; m_z -

коэффициент момента тангажа; c_y - коэффициент подъемной силы.

Положение центра тяжести экраноплана может меняться при размещении груза, но диапазон допустимых положений центра тяжести выбирается

в ходе разработки концептуального проекта и аэрогидродинамической компоновки. Положение аэродинамических фокусов по высоте и по углу атаки в основном обусловлено формой корпуса судна, обтекаемого встречным аэродинамическим потоком. Кроме того, положение аэродинамических фокусов зависит от положения судна относительно экранирующей поверхности и встречного аэродинамического потока, меняется при использовании органов управления, и может заметно меняться под действием аэроупругого взаимодействия (флаттера) и других эффектов.

Для проектирования устойчивой компоновки экраноплана выполнение критерия Иродова традиционно считается необходимым, но не достаточным, поскольку от величины межфокусного расстояния зависит характер колебательного движения судна при дестабилизирующих воздействиях и маневрах. Согласно данным

исследований [11] при соотношениях $\bar{X}_{F_h} - \bar{X}_{F_\alpha} < -0,15$ и $\bar{X}_{F_h} - \bar{X}_{F_\alpha} > -0,05$ наблюдается динамическая неустойчивость движения под действием экранного эффекта.

Определение положения аэродинамических фокусов, ранее осуществляемое по результатам экспериментов с моделью в аэродинамической трубе, в последние годы (2017 – 2018 г.г.) всё чаще выполняется по результатам численного моделирования экранной аэрогидродинамики с использованием метода контрольных объемов для решения уравнений Навье-Стокса, реализованного в современном программном обеспечении типа CAE/CAD. В численном исследовании [12] устойчивости компоновки экраноплана с фюзеляжем, оперением и прямоугольным крылом, используя программный комплекс STAR-CCM+ с моделью турбулентности realizable k- ϵ , получено изменение межфокусных расстояний и несущих свойств в зависимости от высоты движения для компоновочных вариантов с различными аэродинамическими профилями. Для исследования изменения характеристик подъемной силы, действующей на крыло под действием экранного эффекта при регулярном волнении подлежащей поверхности, в работе [13] было выполнено численное моделирование с использованием технологии движущихся сеток в программном обеспечении ANSYS Fluent. В работе [14] также с использованием ANSYS Fluent получены результаты численного исследования аэродинамических характеристик самолета под действием экранного эффекта на режиме взлета с учетом деформации водной поверхности (методом Volume of Fraction): показано наличие положительного экранного

эффекта на режимах движения с $\bar{h} > 1,22$. Также серия численных решений уравнений Навье-Стокса методом контрольных объемов для обтекания аэродинамического профиля NASA 4412 в дозвуковом режиме на ультраэкранных высотах с $\bar{h} < 0,1$ была получена в работе [15] в ходе исследования изменения положений аэродинамических фокусов.

Результаты ряда других исследований с использованием технологий численного моделирования, выполненные в указанный период (2017 – 2018 г.г.) также могут быть использованы для анализа устойчивости движения под действием экранного эффекта. Численное исследование закрылка Gurney в конструкции крыла экраноплана было выполнено [16] с использованием ANSYS Fluent: получены зависимости аэродинамических характеристик от высот и углов атаки для разных вариантов конструкции. Флаттирующее крыло под действием экранного эффекта при низких числах Рейнольдса исследовалось в работе [17] методами численного моделирования аэродинамики с использованием многосеточного подхода (перекрывающихся сеток): получено изменение подъемной силы в цикле обращения. Исследование [18] аэродинамики прямоугольного крыла под действием экранного эффекта с использованием программного обеспечения ANSYS CFX с моделью турбулентности realizable k- ϵ показало распределение интенсивности турбулентности сходящего с крыла аэродинамического потока для разных углов атаки. В работе [19] по численному моделированию крыла под действием экранного эффекта исследуется возможность использования

новых материалов для разработки конструкции – с учетом изменения ее формы под действием аэродинамических сил.

Таким образом, за период 2017 – 2018 г.г. можно констатировать высокий интерес мирового научного сообщества к исследованию проблем экранной аэродинамики средствами программных продуктов семейства CAE/CAD, поддерживающих технологии численного моделирования.

Структура вычислительного проекта с использованием CAE/CAD систем для численного решения уравнений Навье-Стокса включает построение геометрии расчетной области, генерацию сетки, задание начальных и граничных условий, итеративный вычислительный процесс и последующую обработку результатов. Стоит отметить, что во всех упоминаемых здесь и ранее [6] работах по численному моделированию экранного эффекта не содержится сведений о возможности и применении методов интеграции модулей вычислительного проекта, с использованием которых осуществляется изменение геометрии конструкции, передача данных, запуск вычислений и другие типичные пользовательские операции. Между тем, автоматизированная интеграция различных программных средств в единый вычислительный процесс позволяет значительно расширить возможности вычислительных экспериментов в проектировании, в том числе - существенно сократить время, необходимое для анализа множества вариантов конструкций и компоновок. В настоящей работе с использованием средств автоматизации выполнения вычислительного проекта ANSYS демонстрируются возможности ускоренного решения задач проектирования экраноплана средствами современных CAE/CAD систем. По результатам применения разработанной методики автоматизированного расчета аэродинамической компоновки экраноплана получены характерные зависимости положения аэродинамических фокусов по высоте и углу тангажа от параметров установки крыла и оперения. Эти зависимости могут использоваться как набор инструментов для тонкой настройки аэродинамической компоновки экраноплана в ходе ее проектирования, как на стадии отработки концептуального проекта, так и на последующих этапах.

Постановка задачи

Исследуются возможности использования технологий автоматизированного проектирования и методов численного моделирования для оптимизации компоновки скоростного судна с динамическим поддержанием в ходе концептуального проектирования. В качестве предмета исследования принята система аэродинамических профилей основного несущего крыла и горизонтального оперения экраноплана ООО «RDC Aqualines» (рисунок 1).



Рис. 1. Буксируемая модель экраноплана ООО «RDC Aqualines» на испытаниях

Особенностью профиля крыла принятой компоновки является продолжительный кормовой участок с малой кривизной на верхней дужке, включение которого, по предварительным предположениям, должно снизить влияние скосов потока, обтекающего профиль горизонтального оперения. По результатам численного моделирования рассчитываются аэродинамические характеристики системы «профиль крыла + профиль горизонтального оперения» под действием экранного эффекта, а именно: коэффициенты подъемной силы и момента тангажа. Вычисляются координаты аэродинамических фокусов по высоте и углу атаки. Координаты аэродинамических фокусов даются в долях средней аэродинамической хорды (САХ) крыла (в направлении от носка крыла к корме) и рассчитываются для режимов движения на высотах с $\bar{h} = 0,1 \dots 0,2$ долей САХ и углом тангажа $\vartheta = 0 \dots 1^\circ$. В качестве входных параметров оптимизационной задачи проектирования принимаются следующие величины:

- установочный угол крыла;
- установочный угол горизонтального оперения (ГО);
- координаты положения горизонтального оперения относительно крыла в продольном и вертикальном направлениях.

Всего проводятся вычисления для более 120 расчетных случаев установки элементов компоновки: крыла и горизонтального оперения. Таким образом, под оптимизацией здесь подразумевается определение диапазона параметров установки компоновочных элементов, для которых выполняются критерии продольной статической устойчивости.

Методика автоматизированного расчета

В основе решения поставленной задачи используются методы вычислительной гидрогазодинамики, реализованные в программном обеспечении ANSYS. Схема вычислительного проекта, построенного в программной среде ANSYS Workbench, показана на рисунке 2. Вычислительный проект включает интеграцию программного пакета параметрического дизайна Geometry, сеточного генератора Mesh, гидрогазодинамического решателя Fluent и инструмента анализа результатов CFD-Post. Входные параметры задачи настроены в блоке Geometry; расчет коэффициентов аэродинамических сил и моментов по результатам численного моделирования осуществляется в блоке постпроцессора CFD-Post. Основные параметры настроек вычислительного проекта для каждого блока приведены в таблице 3.

Связь блоков запрограммирована с использованием возможностей ANSYS Workbench; входные и выходные параметры вычислений задаются с помощью инструмента Parameter Set. Применение инструмента Parameter Set позволяет рассматривать оптимизационную задачу проектирования в виде неявной зависимости параметров проекта как координат точек многомерного пространства: в ANSYS Workbench используется термин design points – буквально, точки, или этапы дизайна. В процессе численного анализа зависимости осуществляется перестроение геометрической модели (Geometry), передача данных в сеточный генератор и генерация сетки (Mesh), передача сетки в решатель, решение уравнений вычислительной гидрогазодинамики (Fluent), передача результатов в постпроцессор и их обработка (CFD-Post). Все процессы, за исключением настройки блоков вычислительного проекта (включая связывание) и задания значений входных параметров, в ходе расчета вариантов компоновки осуществляются автоматически, без вмешательства пользователя. В отличие от перестроения геометрии, сетки и запуска расчетов «вручную», такой подход позволяет значительно сократить временные ресурсы и выполнить численный анализ более чем 120 расчетных случаев в течение 4 - 5 часов вычислений при использовании компьютера с четырьмя физическими ядрами процессора типа Intel Core i7 и доступной оперативной памятью 32 Гб.

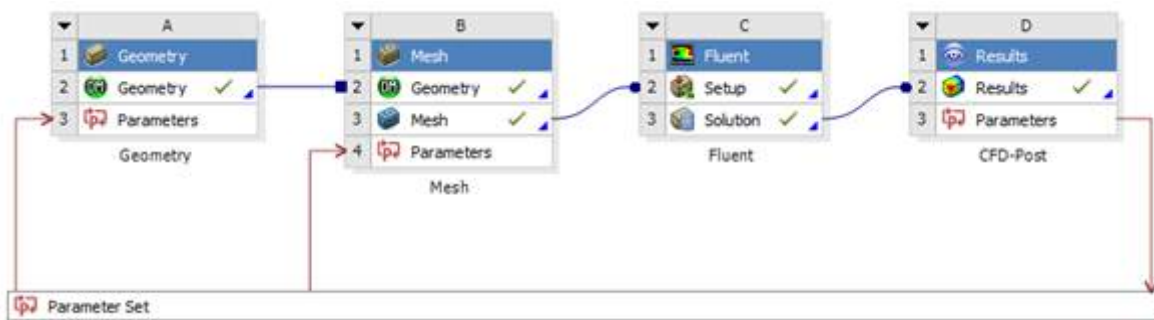


Рис. 2. Схема вычислительного проекта автоматизированного расчета в ANSYS Workbench

Основные параметры настроек блоков вычислительного проекта

Блок	Параметры настроек
Geometry	Плоская постановка (2D геометрия). Размеры расчетной области в 5x22 длин САХ. Входные параметры оптимизационной задачи программируются как настройки операций трансформации геометрии.
Mesh	Четырехугольные контрольные объемы (2D). Высота ближайшего контрольного объема по нормали к стенке профиля $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ длины САХ. Используется логарифмический закон роста элементов с коэффициентами 1,05 на локальном уровне и 1,2 на удалении от пристеночной области. Параметры сетки пространства основного течения определяются настройкой максимального размера контрольного объема.
Fluent	Число Рейнольдса $\sim 10^7$. Используется модель вязкости k- ω SST. Граничные условия: Velocity Inlet, Pressure Outlet, Moving Wall.
CFD-Post	Для программирования выходных параметров используются настройки пользовательских выражений Expressions и встроенного языка CEL.

Стоит отметить, что ранее с использованием программного обеспечения ANSYS выполнялась: верификация результатов численного моделирования аэродинамики экраноплана [20]; валидация методик численного моделирования аэрогидродинамики амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой [6];

теоретический и численный анализ несущих способностей крыла под действием экранного эффекта [21];

то есть отдельные компоненты изложенной в настоящей работе методики апробированы в ходе решения проектных и исследовательских задач судов, использующих экранный эффект. Также стоит отметить, что возможности методики не ограничиваются «плоским» случаем аэродинамических профилей, и с использованием больших вычислительных ресурсов может быть реализовано для системы крыльев конечного удлинения, а также, если это будет принято целесообразным, для компоновки экраноплана в целом.

Результаты вычислений

Результаты вычислений по изложенной методике приведены на рисунках 3...6.

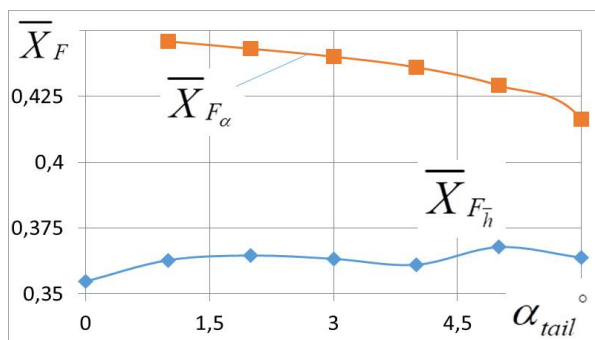


Рисунок 3. Зависимости координат аэродинамических фокусов от угла установки горизонтального оперения

α_{tail}

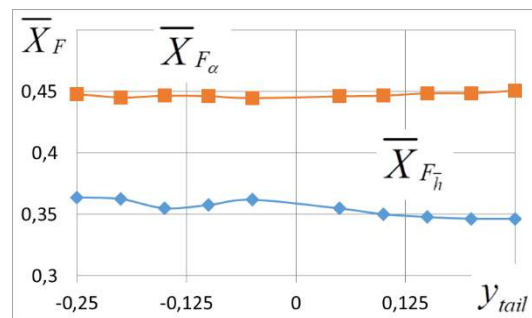


Рисунок 4. Зависимости координат аэродинамических фокусов от высоты установки горизонтального оперения

y_{tail} (в долях САХ) относительно исходного положения

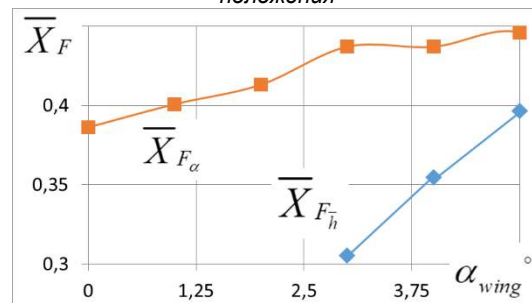


Рисунок 5. Зависимости координат аэродинамических фокусов от угла установки крыла

α_{wing}

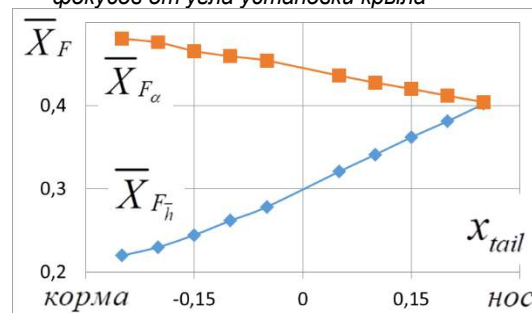


Рисунок 6. Зависимости координат аэродинамических фокусов от продольной координаты установки горизонтального оперения

x_{tail} (в долях САХ) относительно исходного положения

Обсуждение результатов

В ходе анализа полученных результатов обращают на себя внимание следующие тенденции:

1. Для всех режимов движения судна, результаты исследования которых представлены на рисунках 3...6 (за исключением крайне носового положения горизонтального оперения) наблюдается удовлетворение критериям Иродова при выборе относительно носового положения центра масс с

координатой $\bar{X}_T \approx 0,25...0,35 \text{ САХ}$.

2. Увеличение угла установки горизонтального оперения не оказывает заметного влияния на положение фокуса по высоте и способствует смещению на 2 – 3 % длины САХ в направлении носа судна положения фокуса по углу.

3. Изменение положения горизонтального оперения по высоте относительно крыла не влияет на положение аэродинамического фокуса по углу и незначительно влияет на положение фокуса по высоте: с ростом высоты установки ГО наблюдается тенденция смещения координаты фокуса по высоте в направлении носа судна на 2 – 3 % длины САХ.

4. Увеличение установочного угла несущего крыла приводит к заметному смещению координат аэродинамических фокусов в направлении от носа к корме: при этом, тенденция смещения фокуса по высоте значительно более выраженная по сравнению с фокусом по углу. Для обеспечения динамической устойчивости исследуемой компоновки согласно данным работы [11] рекомендуется рассмотреть возможность увеличения угла установки крыла.

5. Смещение горизонтального оперения в направлении от носа к корме приводит к заметному увеличению межфокусного расстояния: фокус по углу смещается в направлении кормы, а фокус по высоте – в направлении носа судна. Для соответствия результатам [11] с целью обеспечения динамической устойчивости может быть рассмотрена возможность смещения оперения в направлении носа судна.

6. Аэродинамический профиль с продолжительным кормовым участком малой

кривизны на верхней дужке может быть рекомендован для проектирования экранопланов с относительно носовым положением центра масс - в отличие от аэродинамических профилей с сохранением кривизны кормового участка верхней дужки, рекомендуемых для экранопланов с относительно кормовой центровкой [22].

В целом, можно констатировать, что разработанная методика автоматизированного оптимизационного расчета аэродинамики экраноплана позволяет в короткие сроки получать результаты вычислительных экспериментов для анализа концептуального проекта судна. Результаты вычислений не противоречат ранее известным данным [23] и согласуются с результатами испытаний буксируемой модели (рисунок 1), что позволяет использовать их в качестве информации для дальнейшего проектирования экраноплана.

Заключение

С использованием современного CAE/CAD программного обеспечения фирмы ANSYS, поддерживающего технологии численного моделирования гидрогазодинамики, разработана методика автоматизированного оптимизационного расчета по критериям продольной статической устойчивости аэрогидродинамической компоновки экраноплана. Апробация методики выполнена для более чем ста вариантов установки несущего крыла и горизонтального оперения экраноплана: получены зависимости положений аэродинамических фокусов по высоте и углу атаки от параметров установки компоновочных элементов. Результаты расчетов сопоставлены с ранее опубликованными данными по судам, использующим влияние экранного эффекта, и с результатами испытаний буксируемой модели экраноплана: противоречий в ходе сопоставления данных не выявлено. Использованное при разработке и апробации методики программное обеспечение ANSYS отвечает требованиям современного этапа развития научно-технической парадигмы (четвертой промышленной революции) и позволяет в кратчайшие сроки выполнять численное исследование концептуального проекта судна с аэродинамическим поддержанием.

Литература

1. Щедровицкий П., Алейник В. и др. Три догоняющие индустриализации России: электронный конспект лекции (электронный ресурс). Москва, 2017 г. – <https://shchedrovitskiy.com/lekcii-i-vystuplenija>.
2. Шваб К. Четвертая промышленная революция – М.: Эксмо, 2016. – 138 с. – ISBN 978-5-699-90556-0.
3. Тоффлер Элвин. Третья Волна – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2002. – 784 с.
4. Волкова В.О., Маслов В.М., Соснина Е.Н., Шетулова Е.Д., Ширшин Г.А. Философия науки: постнеклассические стратегии развития. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2015. – 132 с. – ISBN 978-5-502-00718-4 – с. 68.
5. Панченков А.Н., Любимов В.И. Концептуальное проектирование судов: идеология, основания и виртуальная среда. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2010. – № 28 – ISSN: 1991-8275 – с. 64-78.
6. Февральских, А.В. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 175 с.
7. Лобачев М.П., Кальясов П.С., Лукьянов А.И., Февральских А.В., Шабаров В.В. Сравнительный анализ двух подходов к разработке аэрогидродинамической компоновки скоростного амфибийного судна. Морской вестник. – 2017. – №3(63). – ISSN 1812-3694 – с. 22 - 27.
8. Кальясов П.С. Численное моделирование аэрогидродинамики амфибийных судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа: дис. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2011. – 137 с.

9. Туманин А.В., Кальясов П.С. Численное исследование гибких ограждений амфибийных судов на воздушной подушке с учетом аэрогидроупругих эффектов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(2) – с. 337–338.
10. Иродов Р.Д. Критерий продольной устойчивости экраноплана при полете с постоянной скоростью вблизи экрана. Ученые записки ЦАГИ. Т. 1. – 1970. – № 4. – С. 63–74.
11. Kornev Nikolai, Matveev Konstantin. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles. 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit – 6-9 January 2003 – AIAA2003-A2600.
12. Juhee Lee. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. Ocean Engineering. – 2018. – № 168 – P. 12–22.
13. Boshun Gao, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Aerodynamics of a Transonic Airfoil above Wavy Ground. AIAA Aerospace Sciences Meeting – January 2018 – doi:10.2514/6.2018-1784.
14. Dongli Ma, Zhi Li, Muqing Yang, Yang Guo, Haode Hu (2018). Sea-unammned aerial vehicle takeoff characteristics analysis method based on approximate equilibrium hypothesis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering – 2018 Vol. 232(6) – P. 1–12.
15. Mohammadhossein Nirooei. Aerodynamic and static stability characteristics of airfoils in extreme ground effect. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering – 2018 – Vol. 232(6) – P. 1134–1148.
16. Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Computation of Flow Field of an Airfoil with Gurney Flap in Ground Effect. 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 2017. – doi:10.2514/6.2017-4466.
17. Umar F., Sun M. Aerodynamic force and power for flapping wing at low reynolds number in ground effect. 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST) — 2018. — doi:10.1109/ibcast.2018.8312279.
18. Alireza Heidarian, Hassan Ghassemi, Pengfei Liu. Numerical Aerodynamic of the Rectangular Wing Concerning to Ground Effect. American Journal of Mechanical Engineering – 2018 – Vol. 6 – No. 2 – P. 43-47.
19. Razali Abidin, Mohamad Asmidzam Ahamat, Tarmizi Ahmad, Mohd Rasdan Saad, Ezzat Hafizi. Preliminary development of a wing in ground effect vehicle. AIP Conference Proceedings 1930, 020004 – 2018. – doi: 10.1063/1.5022898.
20. Блохин В.Н., Прохоров В.М., Кальясов П.С., Якимов А.К., Туманин А.В., Шабаров В.В. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 3(1). – с. 147–154.
21. Кальясов П.С., Лукьянов А.И., Февральских А.В., Шабаров В.В. Применение механизации крыла в виде закрылка и предкрылка на взлетных режимах экранопланов со статической воздушной подушкой. Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 2(36). – т. 2. – ISSN: 2073-7173. – с. 8-14.
22. Грамузов Е.М., Февральских А.В. Аэродинамический профиль несущего крыла для скоростных экранных судов с кормовым расположением центра масс. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2016. – № 49. – ISSN: 1991-8275 – с. 117-122.
23. Маскалик А.И., Нагапетян Р.А., Иваненко В.В., Бутлицкий А.Г., Томилин В.В., Лукьянов А.И. Экранопланы: транспортные суда 21 века – СПб.: Судостроение, 2005 – 576 с.

References

1. Shchedrovitsky P., Aleynik V. and other. Three catch-up industrializations of Russia: electronic lecture synopsis [Electronic resource]. Moscow, 2017. URL: <https://shchedrovitskiy.com/lekcii-i-vystuplenija>.
2. Schwab Klaus. The Fourth Industrial Revolution. Moscow: Eksmo publisher, 2016. – 138 с.
3. Toffler Alvin. The third wave. Moscow: AST publisher, 2002. – 784 p.
4. Volkovs V.O., Maslov V.M., Sosnina E.N., Shetulova E.D., Shirshin G.A. Philosophy of science: post-non-classical development strategies. – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2015. – 132 p. – ISBN 978-5-502-00718-4 – p.p. 68.
5. Panchenkov A.N., Ljubimov V.I. Conceptual ship designing: ideology, bases and the virtual environment. Bulletin of Volga State University of Water Transport. – 2010. – № 28. – ISSN: 1991-8275 – p.p. 64-78.
6. Fevral'skikh A. V. The development of wing-in-ground effect hovercraft design method based on computational fluid dynamics (PhD thesis). Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2017, p.175.
7. Lobachev M. P., Kalyasov P. S., Lukyanov A. I., Fevral'skikh A. V., Shabarov V. V. Comparative analysis of two approaches to the development of aerohydrodynamics configuration of a high-speed amphibian vessel. Morskoy Vestnik – № 63 (3) – 2017 – p.p. 22–27.
8. Kalyasov P. S. Numerical simulation of the aerohydrodynamics of the hovercrafts with ballonet seal (PhD thesis). Nizhni Novgorod: Lobachevsky University, 2011. – 137 p.
9. Tumanin A.V., Kalyasov P.S. The numerical simulation of ACV's skirt including aerohydroelasticity effects. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. — 2011. — No. 4(2). — p.p. 337–338.
10. Irodov, R.D. Criteria of longitudinal stability of ekranoplan. Ucheniye Zapiski TSAGI – 1970. – № 1(4). – p.p. 63–74.
11. Kornev Nikolai, Matveev Konstantin. Complex numerical modeling of dynamics and crashes of wing-in-ground vehicles. 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit – 6-9 January 2003 – AIAA2003-A2600.
12. Juhee Lee. Computational analysis of static height stability and aerodynamics of vehicles with a fuselage, wing and tail in ground effect. Ocean Engineering. – 2018. – № 168 – P. 12–22.
13. Boshun Gao, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Aerodynamics of a Transonic Airfoil above Wavy Ground. AIAA Aerospace Sciences Meeting – January 2018 – doi:10.2514/6.2018-1784.

14. Dongli Ma, Zhi Li, Muqing Yang, Yang Guo, Haode Hu (2018). Sea-unammned aerial vehicle takeoff characteristics analysis method based on approximate equilibrium hypothesis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering – 2018 Vol. 232(6) – P. 1–12.
15. Mohammadhossein Nirooei. Aerodynamic and static stability characteristics of airfoils in extreme ground effect. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering – 2018 – Vol. 232(6) – P. 1134–1148.
16. Xuan Zhang, Qiulin Qu, Ramesh K. Agarwal. Computation of Flow Field of an Airfoil with Gurney Flap in Ground Effect. 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 2017. – doi:10.2514/6.2017-4466.
17. Umar F., Sun M. Aerodynamic force and power for flapping wing at low reynolds number in ground effect. 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST) — 2018. — doi:10.1109/ibcast.2018.8312279.
18. Alireza Heidarian, Hassan Ghassemi, Pengfei Liu. Numerical Aerodynamic of the Rectangular Wing Concerning to Ground Effect. American Journal of Mechanical Engineering – 2018 – Vol. 6 – No. 2 – P. 43-47.
19. Razali Abidin, Mohamad Asmidzam Ahamat, Tarmizi Ahmad, Mohd Rasdan Saad, Ezzat Hafizi. Preliminary development of a wing in ground effect vehicle. AIP Conference Proceedings 1930, 020004 – 2018. – doi: 10.1063/1.5022898.
20. Blokhin V.N., Prokhorov V.M., Kalyasov P.S., Yakimov A.K., Tumanin A.V., Shabarov V.V. The application of computer simulation for the determination of WIG craft aerodynamic characteristics in a cruising regime. Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. — 2012. — No. 3(1). — p.p. 147–154.
21. Kalyasov P. S., Lukyanov A. I., Fevralskikh A. V., Shabarov V. V. Mechanization of wing by flaps ans slats on takepff motion modes of ground effect vehicles with static air cushion. Marine Intellectual Technologies. – 2017. – № 2(36). – V. 2. – p.p. 8-14.
22. Gramuzov E.M., Fevralskikh A.V. Aerodinamical profile of airfoil for high-speed ground effect vehicles with the stern center of gravity. Bulletin of Volga State University of Water Transport. – 2016. – № 49. – ISSN: 1991-8275 – p.p. 117-122.
23. Maskalik A.I., Nagapetyan R.A., Ivanenko V.V., Butlitskiy A.G., Tomilin V.V., Lukyanov A.I. Wing-in-ground effect vehicles – transport ships of 21th century. SPb.: Sudostroenie, 2005. – 576 p.

УДК 629.54

АНАЛИЗ ГРАЖДАНСКОГО ФЛОТА, ПОДКОНТРОЛЬНОГО РМРС

Василий Андреевич Компанец

аспирант кафедры Кораблестроения и океанотехники ИШ
Дальневосточный федеральный университет
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: kompanets.va@dvfu.ru

Аннотация

В статье проанализированы данные, характеризующие гражданский флот, подконтрольный Российскому морскому регистру судоходства (РМРС) по состоянию на 5.09.2018. Источником исходной информации принята регистрационная книга, расположенная на официальном электронном ресурсе РМРС. Данные обработаны и сопоставлены с аналитическими исследованиями, отраженными в работах Житникова А.В. (2007-2009), Шарапова Ю.К. (ноябрь 2014), Сухова О.Э. (2014), Логачева С. И. (1996-2009), Чугунова В. В. (2001-2009), Горина Е. А. (2009).

Полученные закономерности и выводы могут быть использованы для оценки общей динамики флота и получения трендов, для описания типовых судов в группах и оценки их конструктивного совершенства при более подробном рассмотрении, для выявления проблемных зон с целью их дальнейшего устранения.

Ключевые слова: гражданский флот, показатели флота, РМРС, изменения показателей, структура флота, суда, возраст флота, анализ гражданского флота.

ANALYSIS OF CIVIL FLEET, AFFILIATED TO THE RMRS

Vasily A. Kompanets

Postgraduate Student, Department of Shipbuilding and Ocean Engineering of Engineering School
Far Eastern Federal University 690091, Vladivostok, ul. Sukhanova, 8
e-mail: kompanets.va@dvfu.ru

Abstract

The article analyzes the data characterizing the civilian fleet affiliated to the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) as of 05.09.2018. The register book, located on the official electronic resource of RMRS, was accepted as the source of initial information. The data were processed and compared with the analytical studies implemented in the works of A. Zhitnikov. (2007-2009), Sharapova Yu.K. (November 2014), Surova O.E. (2014), Logacheva S.I. (1996-2009), Chugunova V.V. (2001-2009), Gorina E. A. (2009).

The obtained patterns and conclusions can be used to assess the overall dynamics of the fleet and acquire trends, to describe typical vessels in groups and evaluate their constructive perfection with more detailed review, to identify problem areas with a view to their further elimination.

Keywords: civil fleet, fleet indicators, RMRS, changes in indicators, fleet structure, vessels, fleet age, civil fleet analysis.

Введение

Успешное развитие и совершенствование конструкций, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию объектов морской техники с высокими технико-экономическими показателями, не представляется возможным без анализа структуры флота и изучения ее изменения, выявления основных тенденций. Периодическое исследование гражданского флота – важная задача для выявления изменений с целью определения необходимости пересмотра и актуализации отдельных блоков нормативно-технической документации, рекомендаций и требований. Своевременный анализ флота с учетом анализа происшествий позволяет выявить проблемные зоны и предотвратить ряд происшествий либо снизить их тяжесть, а также скорректировать действующие подходы к проектированию, усовершенствовать методики расчета.

1. Анализ состава гражданского флота РФ

Периодические исследования гражданского флота производятся на кафедре кораблестроения

и океанотехники ИШ ДВФУ (ранее ДВПИ, ДВГТУ) в рамках проведения научных и исследовательских работ. Для оценки динамики изменений флота в рамках данного исследования использованы работы Житникова А.В. (2007-2009), Шарапова Ю.К. (ноябрь 2014), Сухова О.Э. (2014), а также работы коллег: Логачева С. И. (1996-2009), Чугунова В. В. (2001-2009), Горина Е. А. (2009).

В период обработки данных (5.09.2018) под надзором РМРС находилось 3384 судна, что превышает отмеченные ранее показатели (2741 [2]). Большая часть флота по-прежнему - морские самоходные суда. Всего в состав входят 22 группы судов. Основную часть флота составляют суда девяти основных типов (доля более 2%): рыболовные суда; суда для генерального груза; нефтеналивные; нефтеналивные/химовозы; пассажирские и пассажирские бескочные; буксиры; рефрижераторные; научно-исследовательские; суда обеспечения и обслуживающие суда. Распределение флота в сравнении с данными [2] представлено на рис.1. С 2014г произошло изменение в части уменьшения доли грузопассажирских судов и существенного увеличения состава прочих групп. Распределение

судов флота в процентном соотношении представлено на рис.2. В сравнении с данными, отраженными в работах Логачева С. И., Чугунова В. В., Горина Е. А. [5-7] общее число судов под контролем РМРС увеличилось. При этом существенно увеличилось количество судов под флагом РФ (с 1755 на 01.01.1998г и с 1711 на 01.01.2000г до 2550 на период исследования).

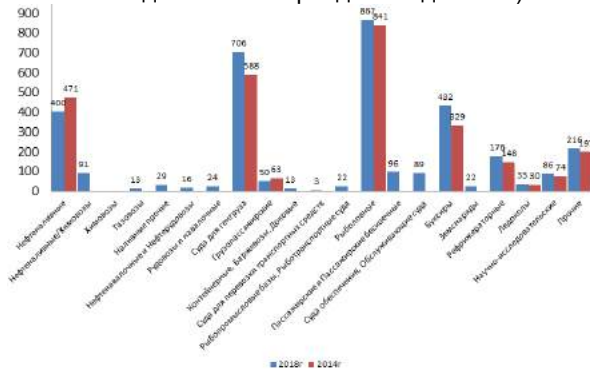


Рис. 1. Изменение состава гражданского флота, подконтрольного РМРС (2018г в сравнении с 2014г) в ед.

2. Анализ возрастного состава гражданского флота РФ

Возрастная структура гражданского флота, подконтрольного РМРС отражена на рис 3. Средний возраст судов по-прежнему превышает нормативный срок службы. На дату исследования средний возраст флота составил 26,5лет, что превышает средний возраст, отмеченный в 2014 на 0,5г. Таким образом, несмотря на существенное количественное увеличение флота, тенденция старения судов сохраняется. Также следует отметить фактическое увеличение возраста судов всех групп за исключением буксиров.

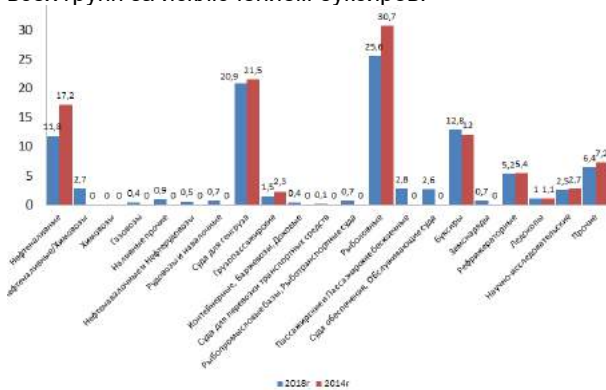


Рис. 2. Изменение состава гражданского флота, подконтрольного РМРС (2018г в сравнении с 2014г) в %.

Для более объективной оценки рассмотрим распределение судов гражданского флота, подконтрольного РМРС по возрастным группам (рис. 4). Наиболее многочисленные группы отмечены в интервалах, превышающих установленный срок службы. Наименьшая группа – новые суда, возрастом до 5 лет. Блок н/д отмечен с целью исключения сомнительных и недостоверных данных из общего рассмотрения. Самый низкий показатель возраста отмечен в группах газовозы (5 лет) и Нефтеналивные/Химовозы (10,5 лет).

В сравнении с данными Логачева С. И., Чугунова В. В., Горина Е. А. [5-7] улучшения ситуации по показателям возраста судов, находящихся в эксплуатации, не выявлено. Следует отметить, что наиболее старыми группами в мире [6] отмечены: группа универсальных сухогрузов (20,5 лет) и группа танкеров (18 лет). В настоящее время в РФ наиболее старой является группа нефтеналивные/нефтерудовозы (34,3 года), группа суда для перевозки транспортных средств (31,7 лет) и наливные прочие (31,7 лет).

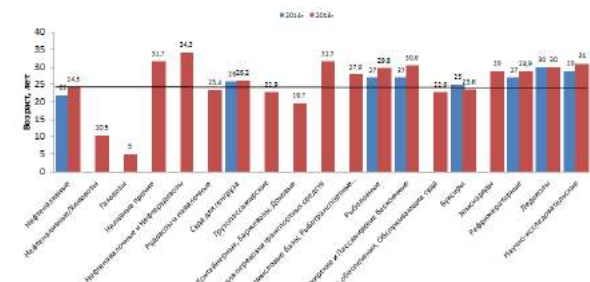


Рис. 3. Возрастная структура гражданского флота, подконтрольного РМРС (2018г в сравнении с 2014г).

3. Анализ качественного состава гражданского флота РФ

Большая часть гражданского флота, подконтрольного РМРС, произведена в СССР и РФ. Распределения гражданского флота РФ по странам производства отражены на рис 5. Заметный рост отмечен в группе судов, произведенных в Японии, Китае, Украине, Норвегии, Румынии. Сокращена доля Болгарии, Финляндии. Количественный рост судов производства РФ в процентном соотношении относительно общего прироста флота незначителен.

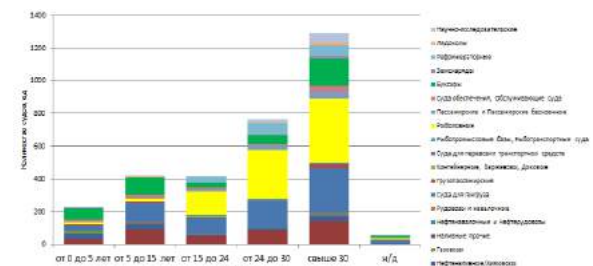


Рис. 4. Распределение судов гражданского флота, подконтрольного РМРС по возрастным группам, ед.

Существенная часть флота, подконтрольного РМРС, имеет ледовые подкрепления корпуса – 2564 ед., что составляет 75,5% от общего количества. Общая структура судов ледового плавания гражданского флота и ледоколов, подконтрольная РМРС представлена на рис. 6. Наибольшая группа судов относится к классу Ice2 (856 ед), Ice1(749 ед), Ice3(337 ед). Совмещение ледовых классов по различным классификациям на рисунке не произведено намеренно для обеспечения углубленного сравнительного анализа информации с другими периодами.

Большая часть рассматриваемого флота (2550 судов или 75,35%) составляют суда под флагом РФ. Распределение судов по принадлежности к флагу представлено на рис. 7. Среди прочих групп выделяются газовозы – их доля под иностранным флагом составляет 100%.

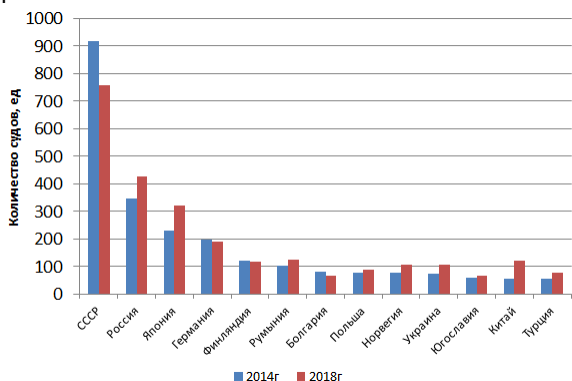


Рис. 5. Распределение судов гражданского флота, подконтрольного РМРС по странам производства (ед.)

Рассмотрим геометрические размеры судов, подконтрольных РМРС. Для анализа размерений рассмотрим расчетную и наибольшую длину судов в группах. При этом выделим их средние и максимальные значения в группе (рис. 8-9). Средние значения длины большинства групп не превышают 150м. Наибольшее среднее значение имеют газовозы и рудовозы.

Следует отметить, что мировая практика проектирования судов предполагает деление судов по длине на 4 группы: менее 90 метров, от 90 до 300 метров, от 300 до 350, от 350 до 500 метров. Судов свыше 350 м под контролем РМРС на рассматриваемый период не выявлено. Суда группы от 300 до 350 м отмечены только в группе нефтеналивных в количестве 3 ед. Близки к ним 4 газовоза с наибольшей длиной 299,9м (4 ед). Наибольшую часть флота составляют суда длиной до 90м (рис.10).

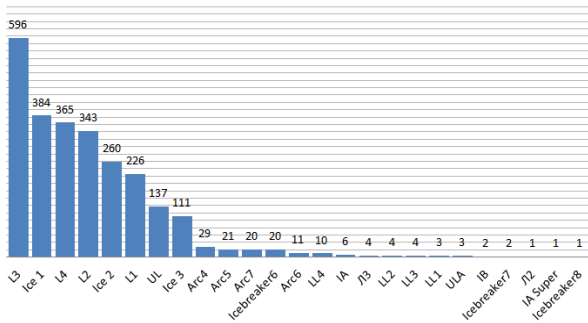


Рис. 6. Общая структура судов ледового плавания и ледоколов гражданского флота, подконтрольных РМРС (2564 судна)

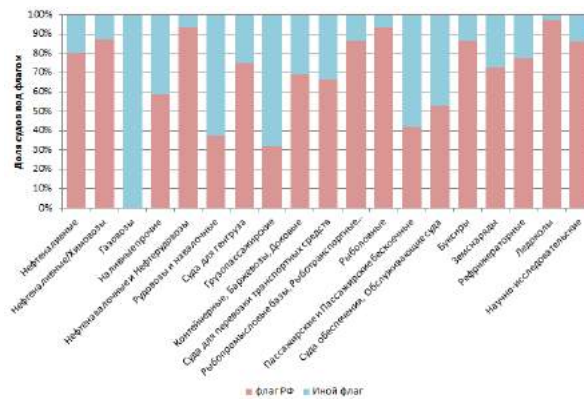


Рис. 7. Распределение судов (%) по принадлежности к флагу

Изменение дедвейта рассмотрим на примере нефтеналивных танкеров (рис. 11). Для сравнения приведены блоки данных на 2001г, на 2008г и на 2018г. В рассматриваемой группе наблюдается существенное непрерывное увеличение количества судов со смещением их максимального количества в зону увеличения дедвейта. Наибольшая группа в 2001г – 2000-5000т; в 2008 – 2000-5000т; в 2018 – 5000-10000т. Также существенно выросла доля судов дедвейтом 10000-30000т.

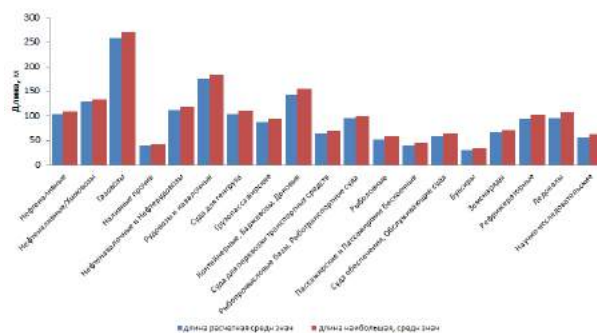


Рис. 8. Средние значения наибольшей и расчетной длин судов по группам.

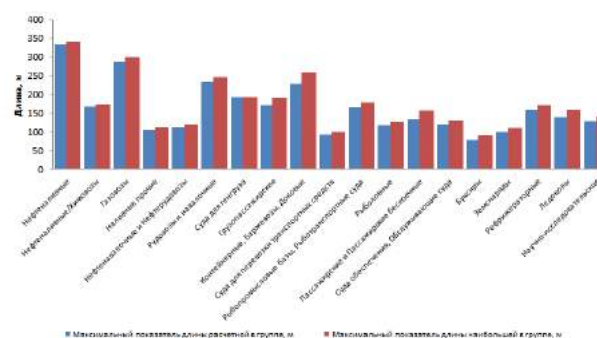


Рис. 9. Максимальные значения наибольшей и расчетной длин судов по группам.

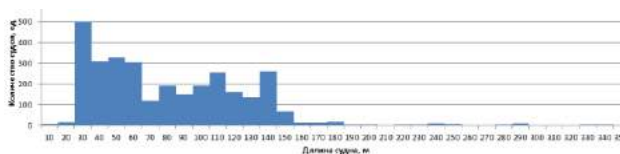


Рис. 10. Распределение судов (ед) по расчетной длине.

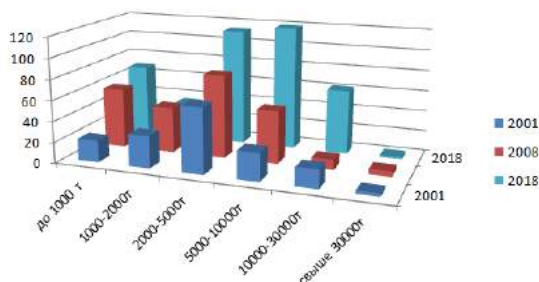


Рис. 11. Распределение нефтеналивных танкеров (ед.) по дедвейту в сравнении с данными [1].

Выводы и заключения

Анализ позволил выделить следующие особенности гражданского флота РФ:

1. Наблюдается существенный количественный рост гражданского флота в сравнении с предыдущим периодом.

Дополнительная информация

Статья подготовлена в рамках выполнения диссертационного исследования и гранта РМРС. Договор № 18-99519 от 24 июня 2018 г. на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Разработка предложений по корректировке требований нормативных документов РС на основе сопоставления металлоемкости конструкций корпуса судов, проектируемых по требованиям РС и требованиям иных классификационных обществ».

Литература

1. Житников, А.В. Имитационное моделирование жизненного цикла корпусов танкеров для судоремонта : дис. канд. техн. наук 05.08.04: / Житников Антон Вадимович ; ДВГТУ - Владивосток, 2009.
2. Шарапов Ю.К. Анализ технического состояния гражданского флота России. // Морские интеллектуальные технологии, №4 (26) Т2. – 2014. – С. 6-11.
3. Суров О.Э. Форсайт – исследования проблем в области диагностики и оценки технического состояния морской техники на перспективу до 2020 г. (научно-технологический прогноз). Владивосток.: ДВФУ, 2014 – 18с.
4. Регистровая книга РМРС [Электронный ресурс] 2018 – Режим доступа : <https://lk.rs-class.org/regbook/regbookVessel> свободный. – Загл. с экрана.
5. Логачев С.И. Отечественное гражданское судостроение прошлое, настоящее, будущее // Судостроение. - 1996. - № 5-6. -С. 1-9.
6. Логачев С. И., Чугунов В. В. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. СПб.: Судостроение, 2001. — 312 с.
7. Логачев С. И., Чугунов В. В., Горин Е. А. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. - СПб.: Мор Вест, 2009. – 539 с.

References

1. ZHitnikov, A.V. Imitacionnoe modelirovanie zhiznennogo cikla korpusov tankerov dlya sudoremonta : dis. kand. tekhn. nauk 05.08.04: ZHitnikov Anton Vadimovich ; DVG TU - Vladivostok, 2009.
2. SHarapov YU.K. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya grazhdanskogo flota Rossii. Morskije intellektual'nye tekhnologii, №4 (26) T2. – 2014. – 6-11pp.
3. Surov O.EH. Forsajt – issledovaniya problem v oblasti diagnostiki i ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya morskoy tekhniki na perspektivu do 2020 g. (nauchno-tekhnologicheskij prognoz). Vladivostok.: DVFU, 2014 – 18pp.
4. Registrovaya kniga RMRS [EHlektronnyj resurs] 2018 – URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/regbookVessel>
5. Logachev S.I. Otechestvennoe grazhdanskoe sudostroenie proshloe, nastoyashchee, budushchee. Sudostroenie. - 1996. - № 5-6. – 1-9 pp.
6. Logachev S. I., CHugunov V. V. Mirovoe sudostroenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. SPb.: Sudostroenie, 2001. – 312 p.
7. Logachev S. I., CHugunov V. V., Gorin E. A. Mirovoe sudostroenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya – SPb.: Mor Vest, 2009. – 539 p.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.74: 624.012

ПРИМЕНЕНИЕ НАДУВНЫХ ЭЛАСТИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ РЕМОНТЕ И ИСПЫТАНИЯХ КОРПУСОВ СУДОВ

Анатолий Петрович Аносов

доктор технических наук, профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники
Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Инженерная школа
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
E-mail: anosov49@mail.ru

Николай Иванович Восковщук

кандидат технических наук, профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники
Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Инженерная школа
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
E-mail: nvoskov@mail.ru

Юрий Константинович Шарапов

Инженер-инспектор, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
692904, Находка, ул. Портовая, 1
E-mail: yksh@mail.ru

Аннотация

В статье представлены особенности использования надувных эластичных оболочек (НЭО) для выполнения ряда технологических операций. Приведены полученные зависимости для определения усилий взаимодействия НЭО с корпусом судна. Обоснован способ создания в корпусе ремонтируемого в доке корпуса судна начальных напряжений с целью компенсации ремонтных (сварочных) напряжений. В сравнении с существующими методами предварительного напряжения корпуса существенно упрощается процедура расчетов, связанных с постановкой судна в док с заданной погиебью, а также возможно многократное изменение погиби судна без вывода судна из дока и перестройки стапеля. Кроме того, рассмотрен метод испытаний на общую прочность корпуса судна в доке с использованием НЭО при моделировании нагрузок, действующих на корпус при движении судна на морском волнении. Представленные способы и соответствующие устройства защищены патентами.

Ключевые слова: надувные эластичные оболочки, компенсация ремонтных напряжений при доковом ремонте, испытания корпуса судна на общую прочность.

APPLICATION OF INFLATABLE ELASTIC SHELLS FOR PERFORMANCE OF PROCESS OPERATIONS DURING REPAIR AND TESTS OF SHIP'S HULLS

Anatoly P. Anosov

Dr.Sci.Tech, Professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering,
Far Eastern Federal University (FEFU), School of Engineering
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.
E-mail: anosov49@mail.ru

Nikolay N. Voskovschuk

PhD in Engineering Science, Professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering,
Far Eastern Federal University (FEFU), School of Engineering
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.
E-mail: nvoskov@mail.ru

Yury K. Sharapov

Inspector Engineer, FAI "Russian Maritime Register of Shipping"
692904, Nakhodka, st. Portovaya, 1
E-mail: yksh@mail.ru

Abstract

The article presents the features of applying inflatable elastic shells to perform a number of process operations. The obtained dependences are given to determine efforts of interaction between the inflatable elastic shells and a ship's hull. The method of creating initial stresses in the ship's hull, repaired in the dock, to compensate for the repair (welding) stresses is substantiated. Comparing with the existing prestressing methods of a hull, the procedure of calculations related to the docking of a vessel with a given camber is simplified, and there is a potential to repeatedly change the camber of a vessel without undocking the vessel and rebuilding a slipway. Besides, the test method for the overall ship's hull strength in the dock with application of the inflatable elastic shells when simulating loads acting on a hull when a

ship is moving at sea, has been reviewed. The presented methods and the corresponding devices are protected by patents.

Key words: inflatable elastic shells, compensation of repair stresses during dock repairs, tests of a ship's hull for overall strength.

Введение

Надувные эластичные оболочки (НЭО) могут использоваться в качестве оснастки при различных технологических операциях при постройке и ремонте судов и их испытаниях. В странах юго-восточной Азии НЭО широко применяются для перемещения судов (рис. 1, 2, снимки сделаны на судостроительном и судоремонтном предприятии в г. Далянь, КНР – прим. авторов).



Рис. 1. Использование НЭО для перемещения судна с криволинейными обводами (судно установлено на оборудованную кильблоками платформу с плоской нижней поверхностью)



Рис. 2. Подготовка плоскодонного судна к перемещению в плавучий док для спуска на воду (НЭО укладывают непосредственно под днище)

Кроме этого НЭО могут использоваться при креновании или взвешивании судна на берегу [7, 8, 9, 11], для установки судна на килевую дорожку заданной кривизны с целью задания начального изгиба корпуса для компенсации ремонтных напряжений, для проведения прочностных испытаний корпуса в целом и отдельных его перекрытий.

Используемые при перемещении судов оболочки, которые могут применяться и при других технологических операциях, выполнены из армированной резины и представляют собой длинные цилиндры ($l \gg D_0$, где l – длина цилиндрической части НЭО, а D_0 – ее диаметр) с концевыми участками, близкими по форме к конусам (рис. 1).

Если судно имеет большую цилиндрическую вставку при плоском (без килеватости) днище, НЭО помещаются непосредственно между стапель-палубой или стапель-площадкой и днищем (рис. 2).

В случаях, когда днище судна с криволинейными на большей части длины обводами корпуса практически не имеет плоского участка, используется специальная платформа с плоской нижней поверхностью, на которой установлены доковые опоры (рис. 1). В этом случае НЭО помещаются между стапель-палубой или стапель-площадкой и платформой.

В зависимости от того, какая технологическая операция выполняется (например, взвешивание или кренование), основная плоскость судна может быть параллельна стапель-палубе дока или береговой стапель-площадке или иметь крен.

Кроме того, оболочка может располагаться вдоль или поперек судна, что при накренивании приводит к различным формам ее деформирования.

Как видно, возможны различные варианты опирания корпуса на НЭО. От характера опирания зависит способ вычисления усилий взаимодействия между корпусом и НЭО и положения точки приложения результирующей этих усилий.

К расчету НЭО применима теория расчета судовых мягких емкостей, используемых для транспортировки грузов (сыпучих или жидких), основные принципы которой изложены в основополагающей работе в этой области [4].

В соответствии с [4] в расчетах НЭО не учитывается их собственный вес, как исчезающе малый в сравнении с усилиями их взаимодействия с корпусом судна и опорной поверхностью. Материал оболочки считается нерастяжимым, а сами оболочки «безмоментными», хотя, строго говоря, в сечениях стенки некруговой (сжатой между днищем и основанием) оболочки действуют изгибающие моменты, однако, относительно небольшие в силу низкого модуля упругости резины и малой толщины стенки.

1. Усилия взаимодействия НЭО с корпусом судна при плоскости днища, параллельной стапель-площадке

В основе расчета усилия, передаваемого НЭО на корпус, лежит рассмотрение равновесия элемента оболочки в ее цилиндрической части, что не представляет затруднений. Сложнее дело обстоит с частью цилиндрической оболочки, примыкающей к концевым участкам, и с самими концевыми участками НЭО. Из-за сложного характера деформирования НЭО в этом районе аналитический расчет возникающих здесь дополнительных усилий невозможен. В связи с этим в дальнейших расчетах дополнительные усилия, возникающие в концевых районах НЭО, определяются приближенно [4], но при этом необходимо использовать уточняющие поправочные коэффициенты, которые могут быть получены в процессе опытной калибровки каждой НЭО заданной нагрузкой.

Кроме того, эти же коэффициенты призваны учесть еще ряд объективных факторов, неизбежно приводящих к погрешностям аналитического расчета, например разброс упругих свойств материала оболочки и их размеров, принятое допущение о нерастяжимости материала, неучет веса оболочки т.п.

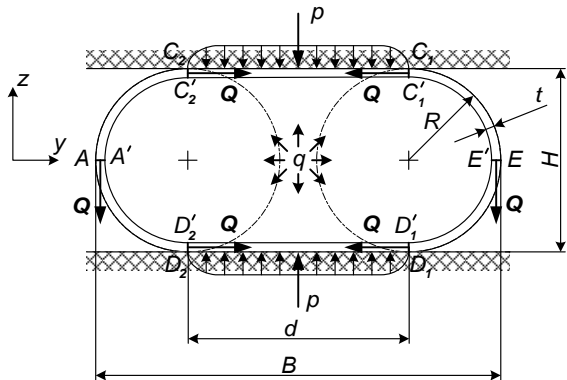


Рис. 3. Расчетная схема НЭО, сжатой между двумя плоскими параллельными поверхностями

Уравнение равновесия верхней части элемента оболочки, отсеченной по линии AB

$$\sum \bar{z}_i = 0; \quad -p - 2Q + q(B - 2t) \cdot 1 = 0.$$

(1)

Уравнение равновесия левой части элемента оболочки, отсеченной по линии C₂D₂,

$$\sum \bar{y}_i = 0; \quad 2Q - q(H - 2t) \cdot 1 = 0. \quad (2)$$

В этих формулах

Q – растягивающее усилие в стенке кольца единичной длины;

B – габаритная ширина деформированной оболочки;

t – толщина стенки оболочки;

H – расстояние между опорными поверхностями (основанием дока и плоскостью дна).

Решая систему уравнений, получим

$$p = q(B - H), \quad (3)$$

т.е. результирующая сила, действующая на корпус со стороны элемента оболочки единичной длины, равна произведению избыточного давления на ширину пятна контакта оболочки с сопряженной поверхностью, т.к. $H = 2R$, а ширина пятна контакта $d = B - 2R$ (см. рис. 3).

Для цилиндрической части НЭО длиной l при равномерном распределении по длине p равнодействующая сила

$$P' = pl = ql(B - H), \quad (4)$$

где $F_{ц} = l(B - H)$ – площадь прямоугольного пятна контакта цилиндрической части.

При сжатии НЭО пятно контакта частично захватывает ее концевые конические части. На рис. 4 показана концевая часть сжатой между двумя параллельными плоскими поверхностями НЭО с диаметром цилиндрической части в недеформированном состоянии D_0 .

Диаметр произвольного сечения конической части НЭО с координатой x при отсчете от начала конической части (рис. 5)

$$D_o(x) = D_o - 2x \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (5)$$

где β – угол при вершине конуса.

При принятом допущении об относительной нерастяжимости материала НЭО в диапазоне рабочих давлений периметр любого ее поперечного сечения при сжатии остается неизменным. Тогда периметр круглого сечения конической части недеформированной НЭО

$$\Pi(x) = \pi D_o(x) = \pi(D_o - 2x \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}), \quad (6)$$

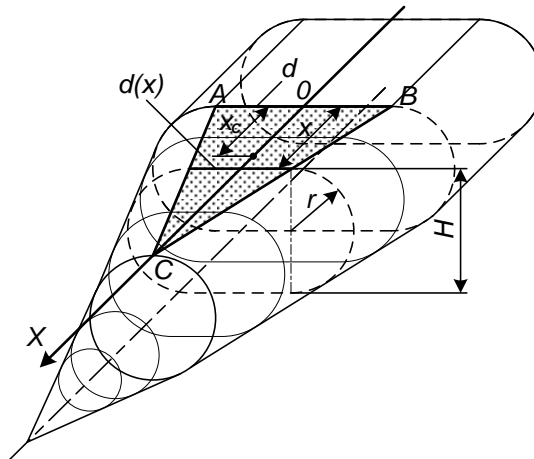


Рис. 4. Конический концевой участок НЭО, сжатой между двумя параллельными плоскими поверхностями

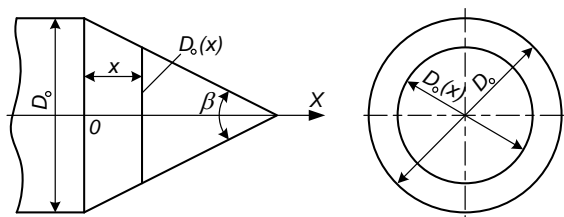


Рис. 5. Конический концевой участок недеформированной НЭО

а периметр овального сечения сжатой оболочки при $r = H/2$ (рис. 4)

$$\Pi(x) = 2 \left[d(x) + \pi \frac{H}{2} \right]. \quad (7)$$

Приравняв (6) и (7), определим переменную ширину пятна контакта в конической части НЭО

$$d(x) = \frac{\pi}{2} (D_o - 2x \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - H), \quad (8)$$

т.е. ширина пятна контакта концевых участков линейно зависит от координаты сечения и, следовательно, боковые стороны пятна контакта являются отрезками прямых, а само пятно контакта от сжатой конической части представляет собой треугольник (на рис. 4 это ΔABC).

Отметим, что полученную треугольную форму пятна контакта сжатого конуса не следует отождествлять с сечением недеформированного кругового конуса плоскостью, параллельной его

продольной оси. Во втором случае контур сечения в конической части оболочки имеет форму гиперболы.

Площадь треугольного пятна контакта

$$F_{\Delta} = \frac{AB \cdot OC}{2},$$

где $AB = d$, а OC определим из условия $d(x) = 0$, соответствующего $x = OC$, т.е.

$$\frac{\pi}{2}(D_o - 2 \cdot OC \cdot tg \frac{\beta}{2} - H) = 0$$

откуда

$$OC = \frac{D_o - H}{2tg \beta/2}.$$

Тогда площадь треугольного пятна контакта

$$F_{\Delta} = d \frac{(D_o - H)}{4tg \beta/2}. \quad (9)$$

Суммарная площадь пятна контакта НЭО, сжатой между двумя плоскими параллельными поверхностями,

$$F = F_{ц} + 2F_{\Delta} = dl + d \frac{(D_o - H)}{2tg \beta/2} = d \left[l + \frac{D_o - H}{2tg \beta/2} \right]$$

или окончательно при $d = B - H$ запишем

$$F = (B - H) \left[l + \frac{D_o - H}{2tg \beta/2} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, площадь пятна контакта НЭО с опорными поверхностями определяется исходными параметрами недеформированной НЭО: диаметром D_o , углом при вершине конической концевой части β , длиной цилиндрической части l и измеряемыми при испытании расстоянием между параллельными опорными поверхностями H и шириной сжатой НЭО B (рис. 3).

Суммарное усилие, передаваемое от сжатой НЭО на корпус, при избыточном внутреннем давлении q определяется выражением

$$P = qF = q(B - H) \left[l + \frac{D_o - H}{2tg \beta/2} \right]. \quad (11)$$

В силу симметрии пятна контакта НЭО с опорной поверхностью относительно середины длины НЭО центр тяжести пятна контакта, являющийся точкой приложения силы P , расположен на пересечении осей симметрии пятна контакта, т.е. на середине длины и ширины.

Для учета приведенных выше возможных погрешностей, аналитический учет которых представляется весьма затруднительным, в полученные формулы следует ввести поправочные коэффициенты, которые могут быть определены опытным путем (калибровкой) для каждой НЭО. При этом полученная зависимость (11) примет вид

$$P_{испр} = k_1 q (B - H) \left[l + \frac{D_o - H}{2tg \beta/2} \right], \quad (12)$$

где k_1 – поправочный коэффициент.

Положение точки приложения силы $P_{испр}$ остается неизменным в силу симметрии пятна

контакта и такого же в среднем распределения по его периметру факторов, влияющих на погрешности аналитического расчета.

2. Регулирование начальных напряжений в корпусе судна при его постановке в док

Регулирование изгиба корпуса судна при его постановке в док может быть связано с необходимостью создания в связях корпуса определенного напряженного состояния, обусловленного компенсацией начальных напряжений возникающих при постановке судна в док, учетом существующей кривизны килевой линии, необходимостью создания начальных напряжений при замене больших участков корпусных конструкций для компенсации концентрации напряжений и сварочных напряжений, а также рядом других причин технологического или прочностного характера.

Описание некоторых способов регулирования изгиба корпуса и их расчетное обоснование приведено в [3]. Конечным результатом во всех случаях является расположение опорных поверхностей доковых опор (клеток) на линии, повторяющей заданную необходимую кривизну килевой линии судна. В их числе:

1. Формирование килевой дорожки из доковых опор различной высоты.

2. Формирование килевой дорожки из клеток различной жесткости с тем, чтобы обеспечить их различную просадку при постановке судна в док.

3. Установка на доковые клетки сминающихся прокладок, с различной деформационной способностью.

4. Установка клеток одинаковой жесткости с различными по длине судна интервалами, обеспечивающая, тем самым, переменную по длине судна податливость килевой дорожки.

Во всех случаях при постановке судна в док происходит деформация доковых опор, просадка основания сухого дока или изгиб плавучего дока и изменение действующих на него сил поддержания воды за счет этого изгиба.

Описанные способы обладают одинаковыми основными недостатками.

Высота клеток, их жесткость, жесткость сминающихся прокладок, интервалы расстановки клеток определяются достаточно сложным и приблизительным расчетом [1, 3]. Приблизительность расчета связана с влиянием случайных факторов: жесткость доковых опор зависит от используемого материала подушек, влажности и температуры окружающей среды, а жесткость основания сухого дока – от грунта, на котором док построен и температуры.

При постановке судна в сухой док решается задача о совместном деформировании под действием весовой нагрузки корпуса судна, доковых опор и основания дока.

При постановке судна в плавучий док задача еще более сложная: при действии весовых нагрузок судна и дока, а также сил поддержания воды, действующих на док, рассматриваются совместные деформации корпуса судна, доковых опор, местные деформации стпель-палубы дока и его изгиб.

Возможна ситуация, когда из-за неточностей расчета после постановки судна в док не обеспечена необходимая кривизна корпуса судна. Кроме того,

возможна ситуация, когда в процессе одной постановки судна в док требуются замены конструкций в противоположных по высоте районах корпуса, т.е. создание противоположных изгибов корпуса для компенсации сварочных напряжений.

Таким образом, при существующих способах обеспечения необходимого изгиба корпуса судна отсутствует возможность корректировки изгиба и, тем более, изменения изгиба на противоположный без вывода судна из дока и переделки килевой дорожки для повторной постановки судна в док.

Предложен способ изменения начальных напряжений в корпусе судна при доковом ремонте посредством его контролируемого изгиба с использованием надувных эластичных оболочек [10]. Сущность предлагаемого технического решения и его практическая реализация иллюстрируются рис. 6.

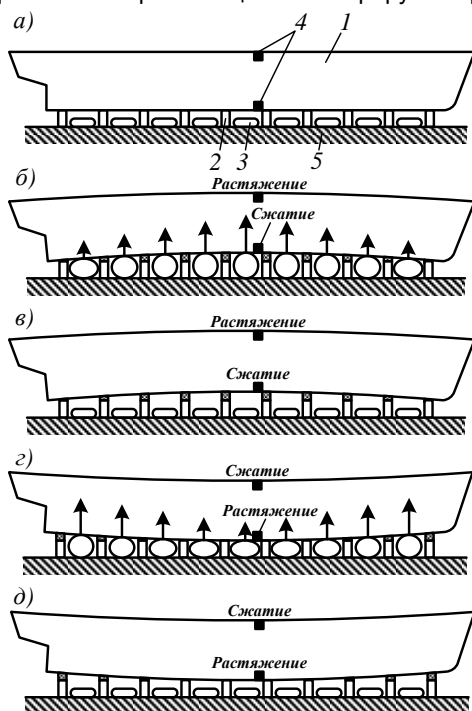


Рис. 6. Регулирование начальных напряжений в корпусе судна при доковом ремонте: а – постановка судна на ровную килевую дорожку; б, в – создание необходимого изгиба судна с помощью НЭО и соответствующее изменение высоты доковых опор; в, д – перестановка судна с НЭО на доковые опоры; 1 – корпус судна; 2 – доковые опоры регулируемой высоты; 3 – НЭО; 4 – датчики напряжений

Способ изменения начальных напряжений в корпусе судна при постановке судна в док реализуется в приведенной ниже последовательности.

Прежде всего, определяется уровень ремонтных остаточных напряжений, которые необходимо компенсировать начальным изгибом корпуса. Их величина зависит от объема и вида ремонта и определяется в каждом конкретном случае с использованием известных методов расчета (например [5]). Рассчитывается давление в надувных емкостях, располагаемых по длине судна, которое с учетом весовой нагрузки судна и изгибной жесткости его корпуса обеспечит заданный его изгиб. Необходимым атрибутом предложенного способа является установка на корпус судна одного или нескольких датчиков для измерения напряжений

(деформаций) в контролируемом районе корпуса. После этого судно ставят в док на килевую дорожку с прямолинейной опорной поверхностью, состоящий из доковых опор регулируемой высоты (рис. 6, а). По датчикам напряжений делают нулевой (базовый) отсчет. Между доковыми опорами на основании дока укладывают НЭО, в которые нагнетается воздух под рассчитанным ранее давлением. При этом с помощью датчиков контролируется уровень напряжений в корпусе судна. При достижении необходимого уровня начальных напряжений изменяют высоту регулируемых доковых опор до касания их опорных поверхностей днища судна, фиксируя, тем самым, заданный изгиб корпуса (рис. 6, б, в, г). Снижая давление в НЭО, устанавливают корпус судна на доковые опоры (рис. 6, в, д). По датчикам напряжений проверяют соответствие фактической величины напряжений в контролируемом районе корпуса судна их заданной величине. Если за счет неточностей в оценке деформации доковых опор появится недопустимое различие между фактическим и заданным уровнем напряжений, то с использованием НЭО путем их повторного заполнения сжатым воздухом корректируется изгиб корпуса судна и высота доковых опор и, тем самым, величина начальных напряжений.

При необходимости кардинального изменения изгиба корпуса судна (например, от прогиба к перегибу) рассчитывается новая комбинация давлений в надувных оболочках, которая обеспечит заданный его изгиб, обусловленный другим необходимым уровнем начальных напряжений, и повторяется описанная процедура. Подобную операцию можно повторять многократно по мере надобности, не прибегая к выводу судна из дока, т.к. в данном случае доковые опоры регулируются, когда судно, находясь в доке, поддерживается НЭО.

Расчет усилий, которые необходимо приложить к корпусу судна, стоящего в доке, для воспроизведения необходимых изгибов выполняется следующим образом.

Приближенные зависимости для определения изгибающего момента, перерезывающей силы и интенсивности распределенной нагрузки на корпус судна с учетом дифференциальной зависимости между ним могут быть представлены в виде (см. [2])

$$M_o(x) = \frac{M_{\otimes}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L_p} \right);$$

$$N_o(x) = \frac{dM(x)}{dx} = \frac{\pi M_{\otimes}}{L_p} \sin \frac{2\pi x}{L_p};$$

$$q_o(x) = \frac{dN(x)}{dx} = \frac{2\pi^2 M_{\otimes}}{L_p^2} \cos \frac{2\pi x}{L_p},$$

где $M_{\otimes}(x)$ – изгибающий момент в миделевом сечении; L_p – расчетная длина судна.

При постановке судна в док в корму и в нос от крайних доковых опор килевой дорожки образуются свесы, имеющие веса соответственно P_K и P_H , и центры приложения этих сил, отстоящие от крайних

клеток на расстояния a_K и a_H соответственно (рис. 7, а).

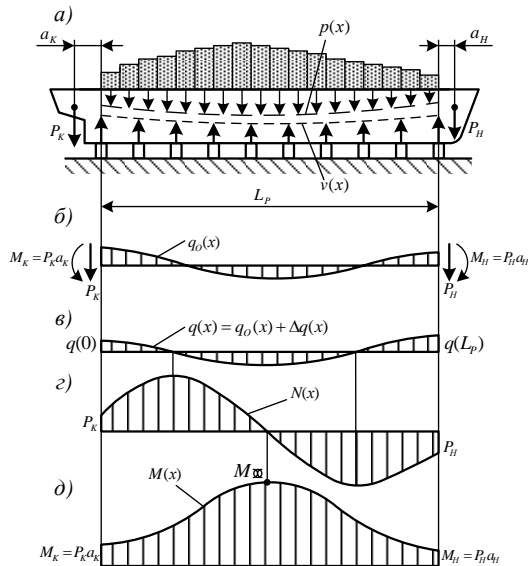


Рис. 7. Внешние и внутренние усилия, действующие на корпус судна в доке: а – расчетная схема; б – усилия действующие на корпус; в – результирующая распределенная нагрузка; г – эпюра перерезывающих сил; д – эпюра изгибающих моментов

Распределенная нагрузка на корпус (рис. 7, а, б)

$$q_0(x) = p(x) + v(x),$$

где $p(x)$ – закон изменения весовой нагрузки по длине судна; $v(x)$ – закон изменения сил поддержания по длине судна, которые при постановке судна в док являются распределенной реакцией килевой дорожки.

Расчетная схема для корпуса судна, как балки, показана на рис. 7, б. Система сил, приложенных к корпусу, должна быть взаимно уравновешенной, для чего для плоской системы сил при отсутствии продольных усилий должны выполняться два условия равновесия. Принимая начало координат на кормовой доковой опоре, запишем

$$\sum \bar{z}_i = \int_0^{L_P} q(x) dx + p_K + p_H = 0;$$

$$\sum m_{0i} = \int_0^L xq(x) dx + p_H L_P + M_H - M_K = 0.$$

Здесь

$$q(x) = q_0(x) + \Delta q(x),$$

где $\Delta q(x)$ – поправка к $q_0(x)$, которая обеспечит выполнение условий равновесия. Поправку примем в виде

$$\Delta q(x) = ax + b,$$

откуда

$$q(x) = \frac{2\pi^2 M_0}{L_P^2} \cos \frac{2\pi x}{L_P} + ax + b. \quad (13)$$

Подставляя $q(x)$ в уравнения равновесия, получим после преобразований систему линейных алгебраических уравнений относительно постоянных a и b

$$a \frac{L_P^2}{2} + bL_P + P_K + P_H = 0;$$

$$a \frac{L_P^3}{3} + b \frac{L_P^2}{2} + P_H L_P + M_H - M_K = 0.$$

Решая систему уравнений с учетом того, что $M_H = P_H a_H$ и $M_K = P_K a_K$, получим после алгебраических преобразований

$$a = 6 \frac{P_K \left(1 + 2 \frac{a_K}{L_P}\right) - P_H \left(1 + 2 \frac{a_H}{L_P}\right)}{L_P^2}; \quad (14)$$

$$b = 2 \frac{P_H \left(1 + 3 \frac{a_H}{L_P}\right) - P_K \left(2 + 3 \frac{a_K}{L_P}\right)}{L_P}. \quad (15)$$

После подстановки (14) и (15) выражение (13) примет вид

$$q(x) = \frac{2\pi^2 M_0}{L_P^2} \cos \frac{2\pi x}{L_P} + \frac{P_K \left(1 + 2 \frac{a_K}{L_P}\right) - P_H \left(1 + 2 \frac{a_H}{L_P}\right)}{L_P^2} x + 2 \frac{P_H \left(1 + 3 \frac{a_H}{L_P}\right) - P_K \left(2 + 3 \frac{a_K}{L_P}\right)}{L_P}. \quad (16)$$

Эпюра $q(x)$ приведена на рис. 7, в.

Если теперь из $q(x)$ вычесть известную весовую нагрузку судна, то получим необходимый для создания требуемого изгибающего момента закон распределения реакций доковых опор, т.е.

$$v(x) = q(x) - p(x). \quad (17)$$

В соответствии с рассматриваемым способом создания предварительного изгиба корпуса для компенсации ремонтных напряжений изгиб корпуса создается с использованием НЭО с последующей его перестановкой на доковые опоры, опорная поверхность которых повторяет заданную НЭО кривизну корпуса. Таким образом, закон распределения реакций доковых опор (17) первоначально воспроизводится с помощью НЭО. Зная этот закон, несложно рассчитать соответствующие необходимые давления в расположенных под днищем судна НЭО, используя приведенные в разделе 2 зависимости.

Для контроля прочности предварительно напряженного корпуса при проведении ремонтных работ необходимо знать величины действующих в его сечениях перерезывающих сил $N(x)$ и изгибающих моментов $M(x)$. Проинтегрируем дважды выражение (16). Постоянные интегрирования определяются граничными условиями, которые при принятом начале координат на кормовой доковой опоре имеют вид

$$\text{при } x = 0 \Rightarrow N(0) = P_K; M(0) = P_K a_K.$$

Тогда после интегрирования и алгебраических преобразований получим

$$N(x) = \frac{\pi M_{\otimes}}{L_P} \sin \frac{2\pi x}{L_P} + P_K \left(1 + 2 \frac{a_K}{L_P} \right) - P_H \left(1 + 2 \frac{a_H}{L_P} \right) + 3 \frac{P_K \left(1 + 2 \frac{a_K}{L_P} \right) - P_H \left(1 + 2 \frac{a_H}{L_P} \right)}{L_P^2} x^2 + 2 \frac{P_H \left(1 + 3 \frac{a_H}{L_P} \right) - P_K \left(2 + 3 \frac{a_K}{L_P} \right)}{L_P} x + P_K; \quad (18)$$

$$M(x) = \frac{M_{\otimes}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L_P} \right) + \frac{P_K \left(1 + 2 \frac{a_K}{L_P} \right) - P_H \left(1 + 2 \frac{a_H}{L_P} \right)}{L_P^2} x^3 + \frac{P_H \left(1 + 3 \frac{a_H}{L_P} \right) - P_K \left(2 + 3 \frac{a_K}{L_P} \right)}{L_P} x^2 + P_K x + P_H a. \quad (19)$$

Эпюры $N(x)$ и $M(x)$ представлены на рис. 7, г,

д.

Полученные зависимости соответствуют симметричной относительно миделя эпюре изгибающих моментов. В случае необходимости создания асимметричного нагружения изгибающий момент, как показали расчеты, удобно аппроксимировать полиномом шестой степени. Тогда перерезывающие силы и погонная нагрузка в соответствии с имеющимися место дифференциальными зависимостями могут быть представлены полиномами пятой и четвертой степеней соответственно. В остальном методика расчета $q(x)$, $N(x)$ и $M(x)$ аналогична, рассмотренной выше.

Предложенный способ предварительного изгиба корпуса для компенсации ремонтных напряжений имеет следующие преимущества:

1) из-за отсутствия необходимости учета жесткости основания сухого дока или изгибной жесткости и сил поддержания плавучего дока, упрощается процедура предварительного расчета постановки судна в док;

2) установка датчиков напряжений (деформаций) обеспечивает контролируемое и управляемое задание необходимой кривизны корпуса судна при постановке в док;

3) за счет того, что при изгибе корпуса с помощью НЭО одновременно нагружается и деформируется основание сухого дока или корпус плавучего дока, и при перестановке судна с НЭО на доковые опоры деформации и того, и другого доков не меняются, исключено влияния на задаваемую кривизну корпуса судна жесткости основания сухого дока или изгибной жесткости плавучего дока и действующих на него сил поддержания;

4) возможность многократного поднятия судна над доковыми опорами с помощью НЭО, и тем самым, обеспечение регулировки высоты доковых опор без вывода судна из дока дает возможность корректировки или кардинального изменения изгиба корпуса судна в процессе одной постановки в док.

3. Испытание корпусов судов и их крупномасштабных моделей

В реальных условиях эксплуатации при движении судна на волнении его корпус находится в условиях сложного нагружения. В общем случае корпус судна испытывает изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях и кручение.

Источником наиболее достоверной информации о поведении корпусных конструкций в реальных условиях эксплуатации является натуральный эксперимент на судах при движении на нерегулярном волнении.

Подобные эксперименты сложны технически, затратны и не дают возможности варьировать на усмотрение экспериментатора различные сочетания составляющих сложного нагружения корпуса.

В связи с этим в практике экспериментального изучения прочности судовых конструкций широко используются исследования с использованием лабораторных стендов для испытания натуральных конструкций и их моделей и, в том числе, корпусов судов в целом. При этом нагружающие устройства способны воспроизводить как отдельные виды нагружения корпуса судна – изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях и кручение, так и их различные комбинации вплоть до воспроизведения нагрузок, возникающих на реальном нерегулярном морском волнении.

Известен лабораторный стенд, находящийся в Крыловском государственном научном центре, г. Санкт-Петербург, который называется Эллинг ресурсных и статических испытаний, ЭРСИ (рис. 8). Система управления и комплект силовозбудителей обеспечивают пространственное нагружение конструкций в широком диапазоне усилий. Система контроля обеспечивает регистрацию параметров прочности, диагностику повреждений и фиксацию их развития.



Рис. 8. Эллинг ресурсных и статических испытаний. Крыловском государственной научный центр, г. Санкт-Петербург

В основе силовозбудителей лежат гидравлические цилиндры с системой устройств для передачи нагрузок на исследуемую конструкцию. Непосредственная передача локальных усилий от гидравлических цилиндров на исследуемую конструкцию невозможна по двум причинам:

1) реальная внешняя нагрузка на корпус судна представляет собой распределенное по его поверхности давление, а не сосредоточенные силы;

2) большое локальное усилие приведет к местному повреждению исследуемой конструкции.

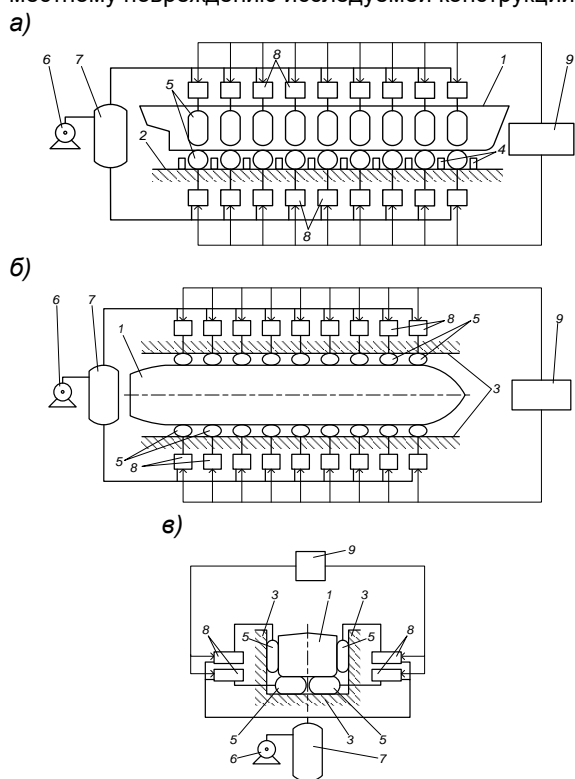


Рис. 9. Общая схема нагружающего устройства: а – боковой вид; б – вид сверху; в – поперечное сечение; 1 – корпус судна; 2 – основание дока; 3 – боковые стенки дока; 4 – доковые опоры; 5 – НЭО; 6 – компрессор; 7 – ресивер; 8 – автоматические коммутационные клапаны; 9 – блок управления автоматическими коммутационными клапанами

Предложено техническое решение [6], расширяющее возможности воспроизведения близкого к реальному сложного нагружения при упрощении нагружного устройства за счет непосредственной передачи распределенных по поверхности корпуса усилий от силовозбудителей (рис. 9).

Опорным контуром служат основание и боковые стены сухого дока. Вертикальные нагрузки, моделирующие силы поддержания создаются двумя рядами симметрично относительно диаметральной плоскости расположенных НЭО под днищем

стоящего в доке судна. Горизонтальные усилия на корпус создаются НЭО, расположенными в зазорах между бортами судна и боковыми стенками дока.

Устройство работает следующим образом (рис. 10).

После постановки судна в док под днищем двумя рядами симметрично относительно диаметральной плоскости укладывают на основание дока НЭО. НЭО помещают также в зазорах между боковыми стенками дока и бортами судна. Создавая в НЭО с помощью компрессора через ресивер и автоматические коммутационные клапаны, управляемые блоком управления, то или иное сочетание давлений, можно воспроизвести любую необходимую комбинацию внешних сил, действующих на корпус судна в процессе эксплуатации, как в статической, так и в циклической постановке.

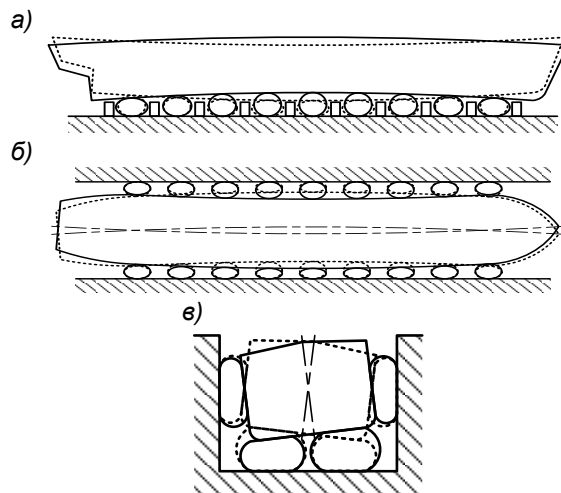


Рис. 10. Принцип действия нагружного устройства: а – изгиб корпуса в вертикальной плоскости; б – изгиб корпуса в горизонтальной плоскости; в – кручение корпуса

Изгиб корпуса в вертикальной плоскости (рис. 10, а) воспроизводится изменением давления в НЭО, расположенных под днищем, в соответствии с изменением сил поддержания по длине корпуса судна при прохождении вдоль судна профиля волны. При этом виде нагружения давление в НЭО, расположенных симметрично относительно диаметральной плоскости меняется одинаково.

Изгиб корпуса в горизонтальной плоскости (рис. 10, б) воспроизводится за счет изменения давления в НЭО, расположенных в зазорах между бортами судна и боковыми стенками дока.

Кручение корпуса (рис. 10, в) моделируется кососимметричным изменением давления в надувных эластичных емкостях, расположенных в два ряда под днищем судна (например, повышением давления в носу по правому борту и в корме по левому борту с одновременным снижением давления в носу по левому борту и в корме по правому борту и наоборот).

Вводя в блок управления те или иные программы изменения давлений в надувных эластичных емкостях можно воспроизвести любую необходимую комбинацию внешних сил действующих на корпус судна.

Принципы расчета давлений в НЭО, которые обеспечивают необходимые параметры режимов нагружения корпуса судна при испытаниях, основан на тех же подходах, которые использованы в разделе 3 с учетом особенностей воспроизведения изгибающего момента в горизонтальной плоскости и крутящего момента.

Таким образом, обеспечена возможность воссоздания сложного нагружения корпуса, соответствующего движению судна на трехмерном волнении, за счет воссоздания близких к реальным распределенных по поверхности корпуса усилий.

Аналогичное устройство может быть изготовлено в уменьшенном масштабе для испытания моделей

корпусов судов в целом и их отдельных отсеков в лабораторных условиях.

Заключение

Способы использования НЭО в качестве технологической оснастки при судоремонте и испытаниях корпусов судов, защищенные патентами авторов, обеспечивают повышение прочности и надежности корпусов судов после ремонта за счет снижения ремонтных напряжений, а также открывают возможности проведения кренования судов на стапеле и испытания их корпусов на берегу с имитацией внешних сил, действующих на корпус в условиях морского волнения.

Литература

1. Антоненко С.В. Докование судов. Теория и практика. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co/ KG, 2012.
2. Короткин Я.И. Прочность корабля / Я.И. Короткин, Д.М. Ростовцев, Н.Л. Сиверс. – Л. : Судостроение, 1974.
3. Ловягин М.А. Металлические плавучие доки / М.А. Лавягин, В.М. Корсаков, Я.Б. Каганер, Э.Н. Гарин, Г.И. Выдревич, А.Л. Бедерман, А.А. Брайнин, И.В. Губкин. Под ред. М.А. Ловягина. – Л. : Судостроение, 1964.
4. Магула В.Э. Судовые мягкие емкости / В.Э. Магула, Б.И. Друзь, В.Д. Кулагин, Е.П. Милославская, М.В. Новоселов. – Л. : Судостроение, 1964.
5. Новиков В.В. Доковый ремонт судов / В.В. Новиков, Г.П. Турмов, И.М. Чибиряк, Г.П. Шемендюк. – Владивосток : Изд-во ДВГУ, 1981.
6. Способ нагружения корпуса судна при проведении испытаний / Аносов А.П., Восковщук Н.И., Шарапов Ю.К. Патент на изобретение №2619354, БИ №14, 15.05.2017.
7. Способ определения веса судна / Аносов А.П., Шарапов Ю.К., Восковщук Н.И. Патент на изобретение №2466901, БИ №32, 20.11.2012.
8. Способ определения веса судна и аппликаты его центра тяжести / Аносов А.П., Шарапов Ю.К., Восковщук Н.И. Патент на изобретение №2466900, БИ №32, 20.11.2012.
9. Способ определения веса судна и аппликаты его центра тяжести / Аносов А.П., Шарапов Ю.К., Восковщук Н.И. Патент на изобретение №2499722, БИ №33, 27.11.2013.
10. Способ регулирования изгиба корпуса судна при его постановке в док / Аносов А.П., Шарапов Ю.К. Патент на изобретение №2626781, БИ №22, 01.08.2017.
11. Шарапов Ю.К. Описание и обоснование возможности применения нового метода определения веса судна и координат его центра тяжести с использованием надувных эластичных оболочек / Ю.К. Шарапов // Морские интеллектуальные технологии. - 2015. - №1(27). Т1. - С. 22-28.

References

1. Antonenko S.V.. Ship's docking. Theory and practice. - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co/ KG, 2012.
2. Korotkin Ya.I., Rostovcev N.L. Sivers N.L., Ship's strengths. Leningrad, Sudostroenie, Publ., 1974.
3. Loviagin M. A., Korsakov V.M., Kaganer Ya. B., Garin E.N., Vydrevich G.I., Bederman A.L, Brainin ., A.A., Gubkin I.V. – Steel floating dock's. Leningrad, Sudostroenie, Publ.,1974.
4. Magula V.E., Druz B.I., Kulagin V.D., Miloslavskaya E.P., Novoselov M.V. –ship's soft shell.
5. Novikov V.V., Turmov G.P., Chibiriak I.M., Shemendyuk G.P. – Dock repair of the ship. Vladivostok, FESTU, Publ. 1981.
6. Anosov A.P., Voskovshuk N.I., Sharapov Y.K., Sposob nagruzhenia korpUSA sudna pri provedenii ispitaniiy [The method of ship's loading while testing]. Patent RF, No. 2619354, bulletin No.14, 2017.
7. Anosov A.P., Voskovshuk N.I., Sharapov Y.K., Sposob opredeleniya vesa sudna [the method of determination of ship's weight]. Patent RF, No. 2466901, bulletin No.32, 2012.
8. Anosov A.P., Voskovshuk N.I., Sharapov Y.K., Sposob opredeleniya vesa sudna i applicati ego centra tiagesti [the method of determination of ship's weight and applicate of ship's centre of gravity]. Patent RF, No. 2466900, bulletin No. 32, 2012.
9. Anosov A.P., Voskovshuk N.I., Sharapov Y.K., Sposob opredeleniya vesa sudna i applicati ego centra tiagesti [the method of determination of ship's weight and applicate of ship's centre of gravity]. Patent RF, No. 2499722, bulletin No. 33, 2013.
10. Anosov A.P., Voskovshuk N.I., Sharapov Y.K., Sposob regulirovaniya izgiba korpUSA sudna pri ego postanovke v dok [The method of regulation of the ship's bend while docking]. Patent RF, No. 2626781, bulletin No. 22, 2017
11. . Sharapov Y.K., Description and justification of opportunity of applications of the new method of determination of vessel weight and coordinates of its center of gravity by using of Inflatable tanks, Marine Intellectual Technologies, Vol.1 (1(27)), 22-29. from <http://morintex.ru/en/>

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДАЛЬНОСТЬ ЗАБРОСА СНАРЯДА МОРСКОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СПАСАТЕЛЬНОГО ЛИНЕМЁТА

Сергей Георгиевич Чулкин

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры технологии судового машиностроения
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт Петербург, ул. Лощманская, 3
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Татьяна Владимировна Зиновьева

Кандидат технических наук, доцент
старший научный сотрудник
Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук
199178, Санкт Петербург, Васильевский остров, Большой проспект, 61
e-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com

Владимир Александрович Пискунов

руководитель проекта
АО «Концерн «НПО Аврора»
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15
e-mail: vladimirpiskunov17@mail.ru

Андрей Борисович Фомичев

доктор технических наук, доцент
директор филиала «НТЦ» АО «Концерн Моринсис-Агат»
190121, Санкт Петербург, ул. Блохина, 19
e-mail: fomichev61@mail.ru

Аннотация

Рассматривается актуальная задача о влиянии конструктивных параметров морского пневматического линемёта на его дальнострельность. Линемёт – это устройство, позволяющее наладить навигацию между спасательным и терпящим бедствие судном на море. С помощью лагранжевой механики построены математические модели всех этапов выстрела линемёта: динамики пневматического клапана, внутренней баллистики, свободного полета снаряда. В дифференциальные уравнения внесены все основные конструктивные параметры линемёта. Уравнения интегрируются средствами компьютерной математики. Проведены многовариантные расчеты внутренней и внешней баллистики, построены зависимости скорости снаряда на срезе ствола от начального давления, величины протечек, «паразитного» объема и массы снаряда. Снаряд пневматического линемёта, вследствие разматывания линия, в математической модели представлен как тело переменной массы. В задаче о свободном полете снаряда произведен учет сил сопротивления воздуха. Построена зависимость дальности полета снаряда от угла наклона линемёта и скорости снаряда на срезе ствола. Представленные в работе математическое моделирование и численные расчеты могут быть использованы для нахождения оптимальных технических характеристик пневматического линемёта.

Ключевые слова: пневматический линемёт, запорный элемент, внутренняя баллистика, внешняя баллистика, лагранжева механика, полет переменной массы, дальность заброса снаряда, скорость снаряда, компьютерная математика.

INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON THE FLIGHT DISTANCE OF SHELL OF MARINE PNEUMATIC LIFE SAVING LINE-THROWER

Sergey G. Chulkin

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of technology ship mashing building
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Tatiana V. Zinovieva

the senior researcher
Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences
Bolshoj pr., 61, V.O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
e-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com

Vladimir A. Piskunov

the project manager

Concern Aurora Scientific and Production Association JSC
 Karbysheva, 15, St. Petersburg, 194021, Russian Federation
 e-mail: vladimirpiskunov17@mail.ru

Andrey B.Fomichov

the docent, Dr.Sci.Tech.,
 Director of the branch "Scientific and Technical Center" JSC "Concern Morinsys-Agat"
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation
 e-mail: fomichev61@mail.ru

Abstract

We consider the actual problem of influence of the design parameters on the flight distance of shell of the marine pneumatic line-thrower; it is a device that allows to establish navigation between a rescue ship and a ship in distress at sea. With the help of Lagrangian mechanics, mathematical models of all stages of the line-thrower shot are constructed: pneumatic valve dynamics, internal ballistics, free flight of the shell. All the main design parameters of the line-thrower are included in the differential equations. The equations are solved by means of computer mathematics. Multivariant calculations of internal and external ballistics are carried out, the dependencies of the shell velocity at the barrel edge on the initial pressure; leakage values, "parasitic" volume and shell mass are obtained. The shell of the pneumatic line-thrower, due to the unwinding of the line, is represented in the mathematical model as a body of variable mass. The problem of the free flight of the shell takes into account the forces of air resistance. The dependence of the flight distance of the shell on the inclination angle of the line-thrower and the velocity of the shell at the barrel edge is obtained. The mathematical modeling and numerical calculations presented in this study can be used to find the optimal technical characteristics of the pneumatic line-thrower.

Keywords: pneumatic line thrower, locking element, internal ballistics, external ballistics, Lagrangian mechanics, variable mass flight, projectile throwing distance, projectile speed, computer mathematics..

Введение

Спасение людей в чрезвычайных ситуациях – одна из важнейших задач инженеров и ученых, целью которых является создание надежных средств и систем спасения, отвечающих всем мировым стандартам. В большом перечне таких средств отдельное место занимают линемёты – устройства, позволяющие наладить навигацию между спасательным и терпящим бедствие судном на море.

Согласно Международной конвенции по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74 безопасным расстоянием между судами в шторм является 230 м. В такой ситуации для переброса спасательного конца – линия с одного корабля на другой используют линемёт (рис. 1). До недавнего времени основными линемётами служили пороховые устройства, в которых заряд пиропатрона зажигал твердое топливо ракеты. Однако из-за сложности хранения и эксплуатации таких изделий они были вытеснены пневматическими устройствами, работающими за счет запасенной энергии сжатого газа в камере линемёта.



Рис. 1. Спасательные операции на море

По принципу действия пневматический линемёт аналогичен пневмопушке, главным узлом которой

является быстродействующий пневматический клапан (рис. 2) [4]. При срабатывании клапана сжатый газ, воздействуя на торец снаряда, разгоняет его в стволе, при этом один конец линия остается заземленным в линемёте стрелка, другой со снарядом перелетает спасаемое судно.

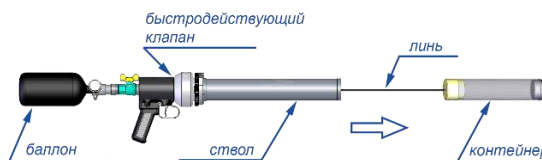


Рис. 2. Схема линемёта

В процессе эксплуатации выявляются технические отказы, при которых линемёт становится непригоден для дальнейшего использования. Натурные испытания пневматических линемётов являются крайне дорогими и длительными, поэтому при их проектировании желательно использовать математическое моделирование.

Данная работа посвящена моделированию процессов, происходящих при выстреле линемёта. С помощью уравнений Лагранжа второго рода описана динамика системы тел линемёта. В дифференциальные уравнения внесены все геометрические параметры, влияющие на скорость метаемого тела на срезе ствола. Проведены расчеты трех этапов: динамики пневматического клапана, внутренней баллистики, свободного полета снаряда. Далее проведены многовариантные расчеты с целью нахождения оптимальных технических характеристик линемёта.

1. Динамика запорного элемента быстродействующего клапана

Процесс выстрела линемёта условно можно разбить на три этапа [2]:

1) начало выстрела – динамика запорного элемента (колпака клапана) быстродействующего клапана.

2) этап внутренней баллистики. Колпак ударяется о направляющую, заканчивая свое движение. Снаряд разгоняется в стволе за счет запасенной энергии сжатого газа в пусковом

устройстве (ПУ), приобретая конечную скорость на срезе ствола.

3) этап внешней баллистики. ПУ заканчивает свое движение. Снаряд движется по настильной траектории, как тело переменной массы, высвобождая лить.

Для описания каждого этапа обратимся к расчетной схеме линемёта, представленной на рис. 3.

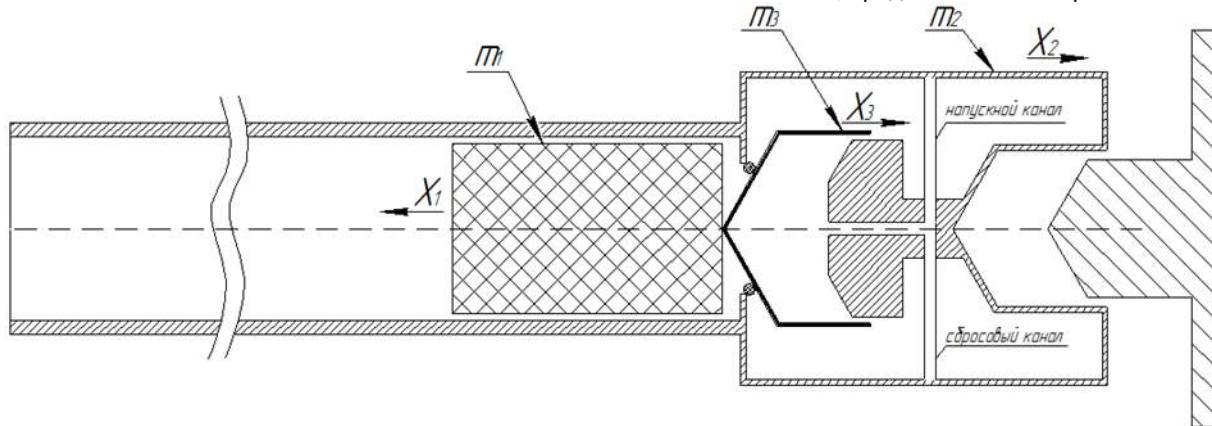


Рис. 3. Расчетная схема линемёта

В задаче имеем три тела: снаряд, ПУ и колпак, массами m_1, m_2, m_3 . Тела движутся прямолинейно, их движение задается обобщенными координатами x_1, x_2, x_3 . Для описания процессов воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода [1]:

$$\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i}\right)^{\bullet} - \frac{\partial K}{\partial q_i} = Q_i^* - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}, \quad (1)$$

где K и Π – кинетическая и потенциальная энергия системы, Q_i^* – непотенциальные обобщенные силы. Выражение для кинетической энергии имеет следующий вид:

$$K(q_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{2} [m_1(x_1) \dot{x}_1^2 + m_2(x_2) \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2], \quad (2)$$

$$m_1 = m_{10} + \rho(l - x_1 - x_2), m_2 = m_{20} + \rho(x_1 + x_2),$$

где m_{10} – масса снаряда, m_{20} – масса ПУ без учета массы снаряда и колпака клапана. Лить, вышедший из снаряда, считается неподвижным относительно пускового устройства.

В правых частях уравнений (1) – обобщенные силы с выделенными потенциальными слагаемыми. Для движения под действием только давления сжатого газа будем иметь $\Pi = \Pi(V)$ – функция от объема газа.

Потенциальную энергию Π определим из следующих соотношений:

$$\Pi = -\frac{\rho_0 V_0^\gamma}{1-\gamma} V^{1-\gamma}, p = -\frac{\partial \Pi}{\partial V}, pV^\gamma = \rho_0 V_0^\gamma,$$

$$V(x_i) = V_0 + S_1 x_{10} + S_1(x_1 + x_2) + S_3(x_3 - x_2) - x_1(S_1 - S_{10}). \quad (3)$$

В выражение $V(x_i)$ входят: V_0 – начальный объем ПУ, S_1 – площадь ствола, x_{10} – начальное положение снаряда в стволе, S_3 – площадь

колпака, S_{10} – площадь снаряда. Второе слагаемое в выражении объема описывает «паразитный объем», увеличение которого сильно ухудшает характеристики разгона снаряда в стволе. Третье и четвертое слагаемое описывают движение снаряда и колпака соответственно, последнее – характеризует протечки сжатого газа в канал ствола, которые также ухудшают параметры разгона. Поскольку время открытия быстродействующего клапана чрезвычайно мало (0,5 – 1 мс), то процесс можно считать адиабатическим, $\gamma = 1,4$.

При выстреле из линемёта необходима опора – «плечо». Для описания отдачи ее можно представить как обобщенную силу со свойствами упругости и демпфирования. Со стороны направляющей на колпак будет также воздействовать обобщенная сила со свойствами упругости. Представим выражения [3]:

$$Q_2^* = -c_2 x_2 - b_2 \dot{x}_2, Q_3^* = -c_3 x_3, Q_1^* = 0. \quad (4)$$

Приходим к следующей системе уравнений Лагранжа:

$$m_1 \ddot{x}_1 - \rho \frac{1}{2} (\dot{x}_1^2 + 2\dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) = p(V) S_{10},$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + \rho \frac{1}{2} (\dot{x}_1^2 + 2\dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) = p(V) (S_1 - S_3) + Q_2, \quad (5)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 = p(V) S_3 + Q_3,$$

где объем V определяется выражением (3). Система нелинейная, шестого порядка. При заданных начальных условиях она интегрируется средствами компьютерной математики. Практическую ценность расчетов представляют собой решения $x_i(t), v_i(t)$.

Первый этап динамики тел линемёта заканчивается соударением КК, как самостоятельного тела, и направляющей в некоторый момент времени t_1 . При этом выполняется условие:

$$x_3(t_1) - x_2(t_1) = \Delta, \quad (6)$$

где Δ – ход колпака по направляющей. Время t_1 определяется численно из уравнения (6).

2. Внутренняя баллистика

После того, как произошло соударение колпака и направляющей, КК, как самостоятельное тело, далее в расчетах не рассматривается, третья координата $x_3(t)$ отсутствует. Система (5) сводится к двум уравнениям

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 - \rho \frac{1}{2} (\dot{x}_1^2 + 2\dot{x}_1\dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) &= \rho(V) S_{10}, \\ (m_2 + m_3) \ddot{x}_2 + \rho \frac{1}{2} (\dot{x}_1^2 + 2\dot{x}_1\dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) &= \rho(V)(S_1) + Q_2^*, \\ V(x_i) &= V_0 + S_1 x_{10} + S_1(x_1 + x_2) + \\ &+ S_3 \Delta - (S_1 - S_{10}) x_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Для расчета параметров разгона снаряда в стволе необходимо воспользоваться начальными условиями, которые определяются конечными скоростями и положениями тел в момент удара КК и направляющей. Задавая численные значения, из системы (7) получим зависимости перемещений и скоростей снаряда и ПУ от времени.

Второй этап – этап внутренней баллистики заканчивается выходом снаряда со среза ствола в момент времени t_2 и выполнением условия

$$x_1(t_2) + x_2(t_2) = L, \quad (8)$$

где L – длина ствола. Время t_2 также определяется численно. Скорость снаряда на срезе ствола $v_1(t_2)$ – крайне важная величина, поскольку характеризует дальность заброса снаряда с линем.

3. Внешняя баллистика

Важной для инженерной практики задачей является увеличение дальности заброса снаряда линемёта. При этом необходимо учесть разматывание линя, а значит, масса забрасываемого снаряда будет переменной.

Проблемам движения тел с переменной массой посвящено достаточно большое количество трудов. Однако и сейчас решение этих задач механики представляет научный и практический интерес в силу актуальности темы и сложности расчетов. Динамика механических систем с переменной массой рассмотрена, например, в работах [5, 6]. Классическое уравнение Мещерского для тела с переменной массой представлено в [7]. Уравнения Лагранжа применяются в [8, 9] для решения задач типа «кембриджских».

Будем предполагать, что разматываемый лить не деформируется и имеет прямолинейную форму на протяжении всего полета. Контейнер с линём представляется материальной точкой. Для описания движения достаточно двух обобщенных координат – полярных координат положения снаряда $r(t), \varphi(t)$.

Расчетная схема полета снаряда в первой постановке представлена на рис. 4.

Для любой точки на плоскости имеем:

$$\mathbf{r}(t) = r(t)\mathbf{e}_r(\varphi), \quad \dot{\mathbf{r}} = \dot{r}\mathbf{e}_r + r\dot{\varphi}\mathbf{e}_\varphi, \quad \mathbf{e}'_r = \mathbf{e}_\varphi.$$

В процессе полета лить разматывается и, соответственно, масса снаряда-контейнера с линем уменьшается:

$$M = m_0 + \rho(l - r), \quad (9)$$

здесь m_0 – масса контейнера без линя, ρ – погонная масса линя, l – его длина.

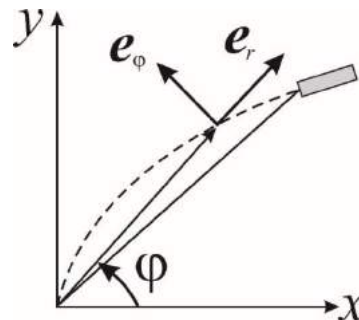


Рис. 4. Схема полета снаряда

Для описания полета снаряда воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода [1]. Кинетическая энергия системы складывается из энергии движения снаряда и энергии вращения разматываемой части линя:

$$K = \frac{1}{2} M(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2) + \frac{1}{6} \rho r^3 \dot{\varphi}^2. \quad (10)$$

Потенциальная энергия системы в поле силы тяжести имеет вид:

$$\Pi = Mgr \sin \varphi + \frac{1}{2} \rho g r^2 \sin \varphi, \quad (11)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Учтем силу лобового сопротивления воздуха по формуле [10]:

$$\mathbf{F} = -k|\dot{\mathbf{r}}|\dot{\mathbf{r}}, k = \frac{1}{2} C S \eta, \quad (12)$$

где C – коэффициент лобового сопротивления воздуха (для снаряда $C = 0,8$), S – площадь миделя, η – плотность воздуха.

Рассмотрим выражение виртуальной работы $\delta A = \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{r} = -k\sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2} (\dot{r}\delta r + r^2\dot{\varphi}\delta\varphi) \equiv Q_r\delta r + Q_\varphi\delta\varphi$, откуда найдем компоненты обобщенной силы:

$$Q_r = -k\sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2}\dot{r}, \quad Q_\varphi = -k\sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2}r^2\dot{\varphi}. \quad (13)$$

Уравнения Лагранжа второго рода

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{r}}\right)^\square - \frac{\partial K}{\partial r} + \frac{\partial \Pi}{\partial r} &= Q_r(t), \\ \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}}\right)^\square + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} &= Q_\varphi(t) \end{aligned} \quad (14)$$

вместе с начальными условиями

$$\begin{aligned} r(0) &= 0, \quad \dot{r}(0) = v_0, \\ \varphi(0) &= \gamma, \quad \dot{\varphi}(0) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

составляют задачу Коши, где v_0 – начальная скорость снаряда, γ – угол наклона к горизонту.

Эта задача решена численно в пакете Mathematica [11] для следующих значений

параметров: $m_0 = 0,5$ кг, $\rho_l = 0,3$ кг, $S = 50,3$ см², $\eta = 1,2$ кг/м³, начальная скорость $V_0 = 80$ м/с. Угол наклона линемёта γ варьировался от 0 до 90 градусов. Результат расчета представлен на рис. 5 в виде зависимости дальности полета от угла наклона. Как показал анализ, максимальная дальность полёта снаряда равная 294,8 метров достигается при угле наклона линемёта $\gamma = 39^\circ$, время полета снаряда до момента падения составляет 8 секунд.

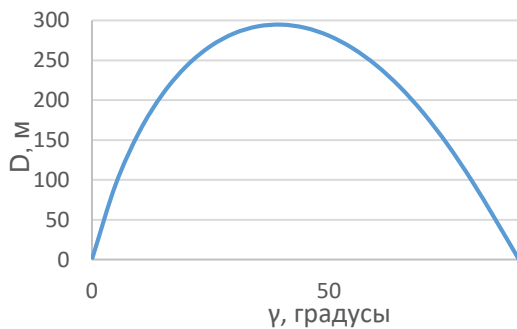


Рис. 5. Зависимость дальности полета от угла наклона линемёта

4. Исследование зависимости скорости снаряда от конструктивных параметров

Основная характеристика, которая определяет дальность заброса снаряда линемёта – это скорость снаряда на срезе ствола. Как показал анализ внутренней баллистики, на ее значение влияют:

- начальное давление в пусковом устройстве;
- масса снаряда;
- зазор между наружным диаметром снаряда и внутренним ствола;
- смещение снаряда относительно «нулевой» точки.

На основе уравнений пп. 1 – 2, были построены зависимости для следующих параметров: $m_{10} = 0,508$ кг, $m_{20} = 7,215$ кг, $m_3 = 0,015$ кг, $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3}$ кг/м, $\rho_0 = 6 \cdot 10^6$ Па, $S_1 = 2,03 \cdot 10^{-3}$ м², $S_{10} = 2 \cdot 10^{-3}$ м², $S_3 = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м², $x_{10} = 0,005$ м, $V_0 = 0,562 \cdot 10^{-3}$ м³, $l = 260$ м.

Первая исследуемая зависимость описывает изменение скорости снаряда на срезе ствола от начального давления ПУ (рис. 6). Зависимость практически линейная, однако из практики применения линемётов выявлено, что для гарантированного заброса контейнера с линём на 260 м скорость последнего должна быть не менее 75 м/с. Из расчетов по формулам п. 2 видно, что такому значению скорости соответствует $p = 5$ МПа.

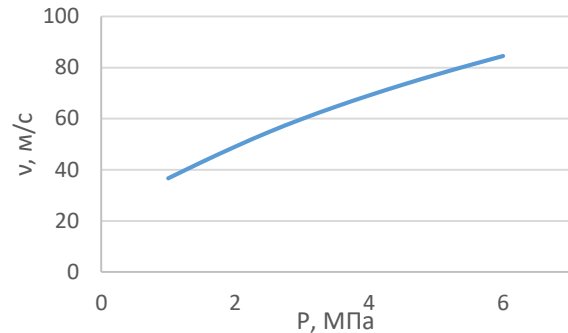


Рис. 6. Зависимость скорости снаряда на срезе ствола от начального давления в ПУ

Баллоны со сжатым воздухом по паспорту имеют выходное давление после редуционного клапана 5,0...5,5 МПа. По результатам расчетов принято следующее решение: для гарантированного заброса снаряда выполнять тарировку редуктора баллона путем установки плоских колец до достижения давления $6,0 \pm 0,1$ МПа. Выходной контроль проводить на цифровом манометре. Герметичность баллона проверять путем опускания в кювету с водой с выдержкой по времени 10 мин.

Отдельным вопросом расчетов внутренней баллистики стало влияние протечек казенного давления в ствол на разгон контейнера. Как известно, в пороховом оружии любая протечка казенного давления заметно снижает скорость пули. В пневматическом линемёте между стволом и метаемым телом обязательно должен быть зазор, в противном случае произойдет отказ прибора. Но выполнение минимально допустимого расстояния достаточно трудно обеспечить технологически.

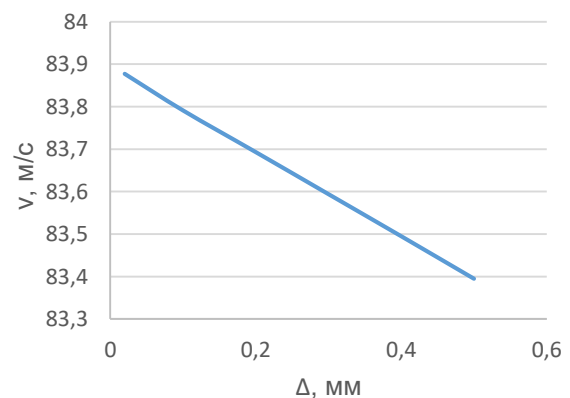


Рис. 7. Зависимость скорости снаряда на срезе ствола от зазора между снарядом и стволом

Как видно из графика (рис. 7), зависимость скорости снаряда на срезе ствола от зазора между снарядом и стволом практически линейная. Увеличение зазора между стволом и контейнером от минимального 0,05 мм до 0,5 мм не оказывает существенного влияния на скорость.

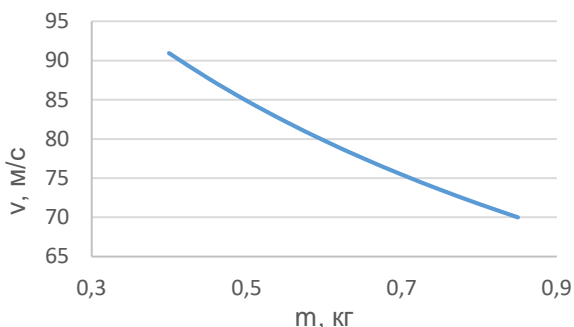


Рис. 8. Зависимость скорости снаряда на срезе ствола от массы снаряда

Из графика, показанного на рис. 8, видно, что уменьшение массы снаряда в два раза не вызывает резкого изменения его скорости. Зависимость практически линейная.

Поскольку линеймет является казнозарядным устройством, и заправка контейнера в ствол осуществляется вручную, то в процессе заряжания снаряд может быть смещен относительно среза клапана. Образуется так называемый «паразитный» объем. Влияние этого смещения на скорость снаряда важный вопрос.

Из графика, показанного на рис. 9, видно, что смещение снаряда относительно нулевой точки на 100 мм вызывает падение скорости на 10 м/с.

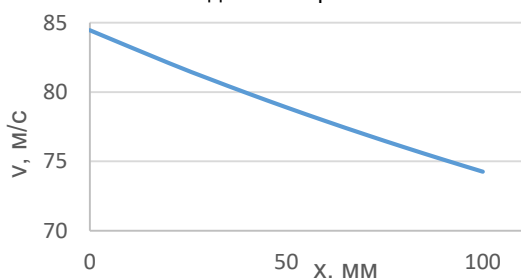


Рис. 9. Зависимость скорости снаряда на срезе ствола от величины смещения снаряда относительно нулевой точки

Каким образом рассмотренные конструктивные параметры влияют на дальнострельность линеймета, наглядно иллюстрирует график на рис. 10, построенный по формулам п. 3. Увеличение скорости на 20 м/с приводит к увеличению дальности полета снаряда на 73 метра.

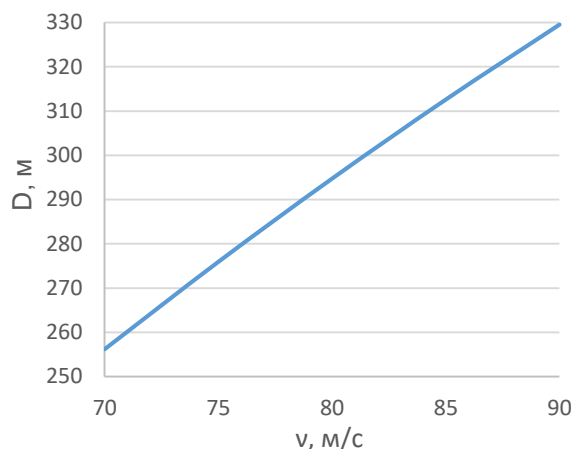


Рис. 10. Зависимость дальности полета от скорости вылета снаряда

Заключение

Проведено математическое моделирование процессов, протекающих на всех этапах выстрела линеймета. Исследование базируется на построении аналитического решения с корректным применением методов лагранжовой механики и дальнейшего расчета с помощью компьютерной математики.

Численное решение уравнений позволило провести многовариантные расчеты и построить зависимости скорости снаряда на срезе ствола от начального давления, величины протечек, «паразитного» объема и массы снаряда. Построена зависимость дальности полета снаряда от угла наклона линеймета и скорости снаряда на срезе ствола.

Литература

1. Елисеев В.В. Механика упругих тел / В.В. Елисеев. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.
2. Елисеев, В.В. Выстрел из пневматического линеймета: три этапа процесса / В.В. Елисеев, В.А. Пискунов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2016. – с. 421-430.
3. Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
4. Павловский, В.А. Моделирование динамики истечения реального газа из резервуара / В.А. Павловский, Ю.Н. Мишутинский, С.А. Неверов // Морские интеллектуальные технологии. – 2016. – с. 114-117.
5. Belyaev, A.K. Dynamics of mechanical systems with variable mass / A.K. Belyaev, H. Irschik. – Springer Wien Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. – 266 p.
6. Eke F.O. On the dynamics of variable mass systems / F.O. Eke, T.C. Mao. – International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol.30 – n.2. – 2002. – pp. 123-137.
7. Casetta, L. The inverse problem of Lagrangian mechanics for Meshchersky's equation / L. Casetta, C.P. Pesce. – Acta Mechanica, Vol.225 – 2014. – pp. 1607–1623.
8. Irschik, H. The equations of Lagrange written for a non-material volume / H. Irschik, H.J. Holl. – Acta Mechanica, Vol.153 – 2002. – pp. 231–248.
9. Irschik, H. Mechanics of variable-mass systems – part 1: balance of mass and linear momentum / H. Irschik, H.J. Holl. – Applied Mechanics Review, Vol.57. – n.2. –2004. – pp. 145–160.
10. Алешкевич, В.А. Курс общей физики. Механика / В.А. Алешкевич, Л.Г. Деденко, В.А. Караваев. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 472 с.
11. Borwein, J.M., Skerit M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica, Springer, Vol. XVI, 2012.

References

1. Eliseev V.V. Mekhanika uprugih tel. SPb., Izd-vo SPbGPU, 2003. 336 p.
2. Eliseev V.V., Piskunov V.A. Vystrel iz pnevmaticheskogo linemyota tri ehtapa processa sovremennoe mashinostroenie nauka i obrazovanie materialy 5-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb., Izd-vo SPbGPU, 2016. pp. 421-430.
3. Lojcyanskij L.G., Lurie A.I. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. M.: Nauka, 1983. 640 p.
4. Pavlovskij V.A., Mishutinskij Y.N., Neverov S. A. Modelirovanie dinamiki istechniya realnogo gaza iz rezervuara. Morskie intellektualnye tekhnologii, 2016. pp. 114-117
5. Belyaev, A.K. Dynamics of mechanical systems with variable mass / A.K. Belyaev, H. Irschik. Springer Wien Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 266 p.
6. Eke F.O. On the dynamics of variable mass systems / F.O. Eke, T.C. Mao. International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol.30, n.2., 2002. pp. 123-137.
7. Casetta, L. The inverse problem of Lagrangian mechanics for Meshchersky's equation / L. Casetta, C.P. Pesce. Acta Mechanica, Vol.225, 2014. pp. 1607–1623.
8. Irschik, H. The equations of Lagrange written for a non-material volume / H. Irschik, H.J. Holl. – Acta Mechanica, Vol.153, 2002. pp. 231–248.
9. Irschik, H. Mechanics of variable-mass systems – part 1: balance of mass and linear momentum / H. Irschik, H.J. Holl. Applied Mechanics Review, Vol.57. n.2. 2004. pp. 145–160.
10. Aleshkevich, V.A. Kurs obschey fiziki. Mehanika. M.:Fizmatlit, 2011. 472 p.
11. Borwein, J.M., Skerit M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica, Springer, Vol. XVI, 2012.

УДК 622.24.05

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТРУБОПРОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА И РЯДА ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ПОДВОДНОГО МАНИФОЛЬДА

Сергей Георгиевич Чулкин

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры технологии судового машиностроения
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Виктория Павловна Карпунина

инженер
АО Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»
190020, г. Санкт-Петербург, Нарвский пр., д. 22, лит. А., пом. 13-Н
e-mail: 15-vika@mail.ru

Андрей Борисович Фомичев

доктор технических наук, доцент
директор филиала «НТЦ» АО «Концерн Моринсис-Агат»
190121, Санкт Петербург, ул. Санкт-Петербург, улица Блохина, дом 19
e-mail: fomichev61@mail.ru

Аннотация

Работа связана с созданием отечественного оборудования для подводной добычи углеводородных ресурсов на континентальном шельфе. Внедрение отечественной системы подводной добычи (СПД) планируется в рамках проекта «Сахалин-3» на базе Южно-Кириинского газоконденсатного месторождения, а также в других проектах, находящихся на континентальном шельфе Российской Федерации. Подводная добыча углеводородов является новой областью морского инжиниринга в России.

Целью работы является разработка технологии создания опытного образца подводного манифольда для сбора углеводородных ресурсов со скважин, а также для распределения реагентов по ним.

Проектирование, с помощью использования различных САПР систем, проведено на основе данных по составу и параметрам системы гидравлики (трубопроводы, материалы, давления, среда, потребители), данных по геометрии, функциональному исполнению и расположению основных составляющих манифольда, действующих нормативно-технических, отраслевых методик и нормативов, национальных стандартов нефтегазовой отрасли.

В работе описана разработанная электрогидравлическая система в части системы трубопроводов малого диаметра элементов опытного образца подводного манифольда и его отдельные элементы в части интерфейсных панелей для телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА).

Численное обоснование принимаемых конструкторских решений, в части проектирования электрогидравлической системы манифольда, позволило оптимизировать конструкцию опытного образца, эффективно выбрать и обосновать номенклатуру покупных изделий для этапа производства подводного манифольда и последующей его установки на Южно-Кириинском нефтегазоконденсатном месторождении.

Ключевые слова: система подводной добычи, подводный манифольд, проектирование, электрогидравлическая система, гидроаккумулятор, система компенсации, система возврата, скорость потока среды, интерфейсная панель, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

DESIGN OF A SMALL BORE PIPELINE SYSTEM AND A SERIES SPECIFIC ELEMENTS OF PROTOTYPE SUBSEA MANIFOLD

Sergey G. Chulkin

the professor, Dr.Sci.Tech
the professor of department of technology ship mashing building
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, Russian Federation
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Victoria P. Karpunina

the engineer
Joint Stock Company Scientific-Production Enterprise
Aviation and Marine Electronics
Russian Federation, 190020, St. Petersburg,
Narva Avenue, 22, lit. A. room 13-H

e-mail: 15-vika@mail.ru

Andrey B. Fomichev

the docent, Dr.Sci.Tech

Director of the branch *Scientific and Technical Center JSC Concern Morinsys-Agat*

Blohina, 19, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

e-mail: fomichev61@mail.ru

Abstract

The work is connected with the creation of domestic equipment for the underwater extraction of hydrocarbon resources on the continental shelf. The introduction of the domestic subsea production system (SPD) is planned as part of the Sakhalin-3 project on the basis of the Yuzhno-Kirinskoye gas-condensate field, as well as in other projects located on the continental shelf of the Russian Federation. Underwater hydrocarbon production is a new area of marine engineering in Russia.

The aim of the work is to develop a technology for creating a prototype of an underwater manifold for collecting hydrocarbon resources from wells, as well as for distributing reagents thereon.

Design using various CAD systems was carried out on the basis of data on the composition and parameters of the hydraulic system (pipelines, materials, pressures, environment, consumers), data on geometry, functional performance and location of the main components of the manifold, current regulatory and technical, industry methods and standards, national standards of the oil and gas industry.

As a result of the research, an electro-hydraulic system has been developed in part of the small-diameter piping system for the elements of a prototype underwater manifold and its individual elements for interface panels for a remote-controlled uninhabited underwater vehicle (TNPA).

Numerical substantiation of the adopted design decisions, in terms of the design of the electro-hydraulic system of the manifold, made it possible to optimize the design of the prototype, effectively select and substantiate the range of purchased products for the production stage of the underwater manifold and its subsequent installation at the South Kirinskoye oil and gas condensate field.

Keywords: subsea production system, underwater manifold, design, electro-hydraulic system, hydroaccumulator, compensation system, return system, fluid flow rate, interface panel, remotely controlled uninhabited underwater vehicle.

Введение

В последние годы наблюдается поступательное расширение антироссийских санкций США и Евросоюза, в частности, в отношении нефтегазового сектора нашей страны. Подразумевается, что они помешают России эффективно осваивать ресурсы нефти и газа. Определенные помехи для наших компаний западные санкции, безусловно, создают: по ряду технологий и оборудования мы все еще зависимы от зарубежных производителей. Но за несколько лет планируется на основе собственных наработок по широкому спектру направлений создать отечественное конкурентоспособное оборудование. Одним из наиболее актуальных вызовов в сфере импортозамещения – развитие технологий и оборудования для месторождений на шельфе. Несмотря на существующие ограничения, освоение шельфовых месторождений в Арктике не только соответствует лицензионным обязательствам компаний, но и опережает их. Уже сейчас на шельфе Арктической зоны России открыто 33 месторождения, а из них почти 300 морских скважин, пробуренных в России, на Арктику приходится чуть менее 90 скважин. То есть добыча в этом регионе не была заморожена, более того, она успешно развивается. Для работы над созданием отечественных образцов шельфового оборудования действует механизм отбора научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Отобранные проекты реализуются за счет государственных средств. В 2016 году была одобрена реализация 14 НИОКР, одной из которой является создание такого элемента системы подводной добычи, как манифольд. Манифольд – система приемных/распределительных коллекторов и трубопроводов с разветвлениями, используемая для сбора пластовой продукции из скважин,

распределения реагентов/инжектируемого газа для поддержания пластового давления, а также газлифтного газа по скважинам (рис. 1) [1-3].



Рис. 1. Подводный манифольд

Система подводной добычи — комплекс подводных устройств, систем и оборудования, предназначенная для обеспечения добычи пластовой продукции на морских нефтегазовых месторождениях с использованием скважин с подводным заканчиванием.

Цель работы – разработка электрогидравлической системы манифольда, элементов конструкции манифольда, а также их 3d-моделей для последующей установки на Южно-Кириинском НГКМ.

Основные элементы манифольда [2]:

- рамная конструкция;
- трубы большого диаметра;
- трубы малого диаметра (сервисные);
- трубопроводная арматура;

- интерфейсы для ТНПА;
- электрическая система;
- вспомогательное оборудование.

Условия эксплуатации, проектируемого опытного образца подводного манифольда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Условия эксплуатации

Параметр	Описание параметра
Расчетная глубина установки, м	500
Проектная глубина установки, м	207
Пластовый флюид	Газовый конденсат
Содержание H ₂ S, % мольных	Отсутствует*
Содержание CO ₂ , % мольных	3.14
Температура окружающей среды (над водой), °С	-36 + +35
Температура окружающей среды (под водой), °С	-1.9 + +2.8
Температура добываемых флюидов (на уровне установки оборудования), °С	До +110
Давление углеводородов, МПа	23
Номинальное давление, МПа	34,5
Сейсмичность района по шкале MSK-64, балл	9
Срок эксплуатации, лет	30

1. Ход выполнения работ по проектированию элементов опытного образца манифольда

Разрабатываемый опытный образец манифольда должен обеспечивать:

- установку на донное основание и передачу нагрузок на него;
- сбор флюида со скважин и распределение реагентов по ним;
- поток к магистральным трубопроводам;
- изоляцию газосборного коллектора от любой скважины, без остановки добычи;
- распределение электрической и гидравлической энергии на фонтанную арматуру;
- возможность внутренней очистки трубопроводов с помощью поршня;
- свободное прохождение тралов.

В конструкции манифольда предусмотрен трубопровод большого (ND>1”) и малого диаметров. Трубопровод большого диаметра включает в себя:

- 2 технологических коллектора со встроенным контуром внутренней очистки;
- изолирующий клапан контура внутренней очистки технологического коллектора;
- 7 технологических ответвлений;
- изолирующие клапаны ответвлений (с гидравлическим приводом);
- коллектор и ответвления линии МЭГ (моноэтиленгликоля) с соответствующими отсечными клапанами (управление с помощью ТНПА);
- ответные части (втулки) системы соединения трубопроводов (горизонтальные цангового типа);
- ответный элемент соединения шлангокабеля (горизонтальные);
- корпус для установки РТ/ТТ (датчик давления/датчик температуры);
- интерфейс для установки акустического датчика поршня.

Трубопровод малого диаметра включает в себя:

- быстроразъемный гидравлический соединитель и логические колпаки;

- гидравлические муфты;
- трубы малого диаметра;
- фитинги и привариваемые переходники;
- многоканальный электрогидравлический блок подсоединения подводного модуля управления;
- система компенсации;
- оперативный приемный резервуар жидкости;
- поршневой аккумулятор;
- гнезда для испытания уплотнений (для испытаний металлических колец во втулках системы соединения).

Функциональные требования к трубопроводам:

- обеспечить добычу газа;
- обеспечить возможность внутренней очистки обоих коллекторов с помощью поршней;
- обеспечить возможность остановки того или иного трубопровода в индивидуальном порядке;
- распределять МЭГ, химреагенты и гидравлические жидкости к эксплуатационным фонтанным арматурам;
- обеспечить обратную линию и линию спуска из затрубного пространства от фонтанной арматуры;
- выдерживать внешние нагрузки от трубопроводов и шлангокабелей;
- выдерживать необходимое давление и температуру;
- выдерживать нагрузки от ТНПА при управлении клапанами;
- распределять подачу гидравлической жидкости на приводы клапанов;
- обеспечить функцию испытания уплотнений для соединений внутрипромысловых трубопроводов;
- обеспечивать гибкость, достаточную для выдерживания нагрузок от расширения под воздействием температур на протяжении всего проектного срока службы.

Панели управления манифольдом (рис.2) посредством ТНПА представляют собой элемент конструкции манифольда, содержащий элементы/интерфейсы управления функциями манифольда:

- интерфейсы управления арматурой манифольда;
- индикаторы открытого и закрытого положения клапанов с соответствующей маркировкой;
- соединительный многоканальный разъем от внутрипромыслового шлангокабеля;
- розетки штепсельного соединения ТНПА для управления системой соединения и испытания уплотнений соединений.

Крепление панелей управления к основной раме должно осуществляться посредством болтовых соединений. Панели управления должны комплектоваться специальным креплением для стабилизации положения ТНПА относительно манифольда [4].

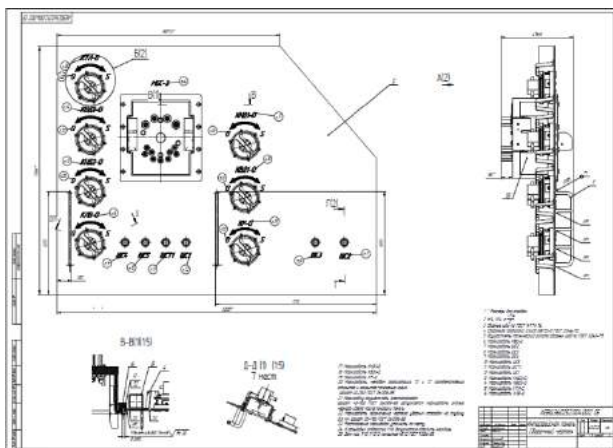


Рис. 2. Панель интерфейсная

Также отдельно должен быть предусмотрен механизм блокировки замков при установке манифольда на донное основание (механическая блокировка с помощью ТНПА).

В ходе выполнения проектирования электрогидравлической системы кустового манифольда (рис.3) были выполнены следующие работы:

- расписана принципиальная схема электрогидравлической системы в отношении трубопроводов малого диаметра, а также проработан сборочный чертеж электрогидравлической системы с подробным указанием способов крепления трубопроводов малого диаметра к таким элементам, как хомуты, гидроаккумуляторы, шаровые краны, МБРС,

расположенные на соответствующих интерфейсных панелях;

- выбран предохранительный клапан фирмы Haskel;
- выбраны элементы запорной арматуры;
- выбрана система подвеса трубопроводов малого диаметра;
- созданы 3D-модели трубопроводов малого диаметра, арматуры и элементы подвесных конструкций, каталог трубопроводов;
- создана 3D-модель размещения на раме элементов электрогидравлической системы, относящихся к трубопроводам малого диаметра;
- проработаны опоры системы электрогидравлики (рис.4), созданы 3D- модель и сборочные чертежи с подробной детализацией;
- созданы 3D-модель интерфейсных панелей, сборочные чертежи с подробной детализацией подсоединяемого оборудования;
- произведены расчеты и выбраны гидроаккумуляторы системы резервного питания;
- произведен расчет и выбран гидроаккумулятор системы возврата;
- произведены расчеты прочности трубопроводов ЭГ системы, определены допустимые толщины труб от действия расчетного давления согласно техническим требованиям.

В целом разработанная 3d-модель опытного образца манифольда представлена на рис.5.

Для производства предполагается использовать трубы немерной длины, а для этого гнуть их на трубогибном станке. Для приварки труб к арматуре необходимо произвести разделку кромок.

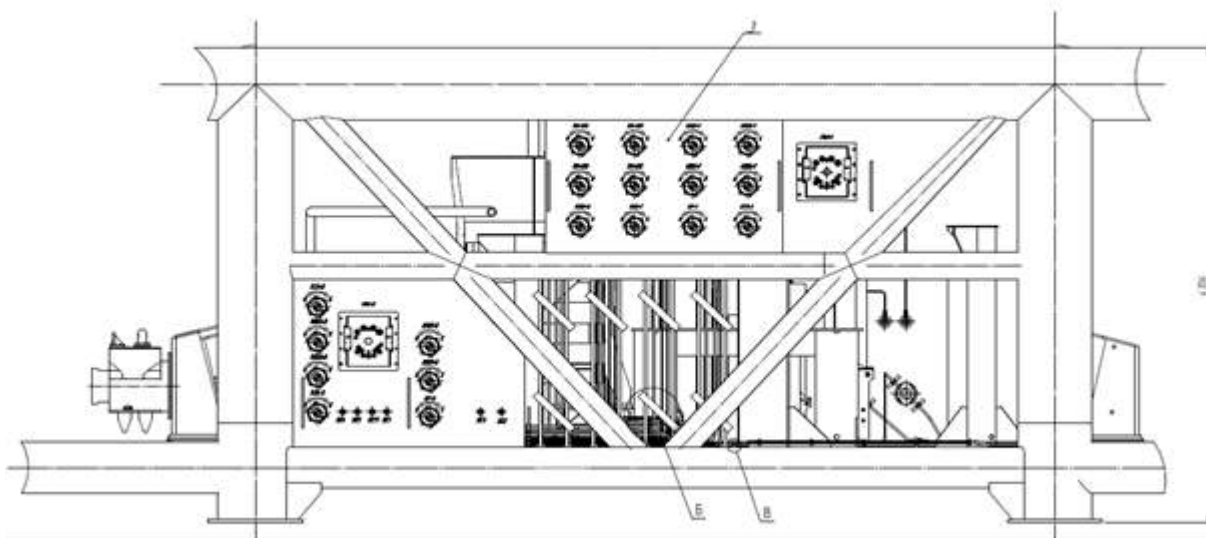


Рис. 3. Система электрогидравлическая кустового манифольда

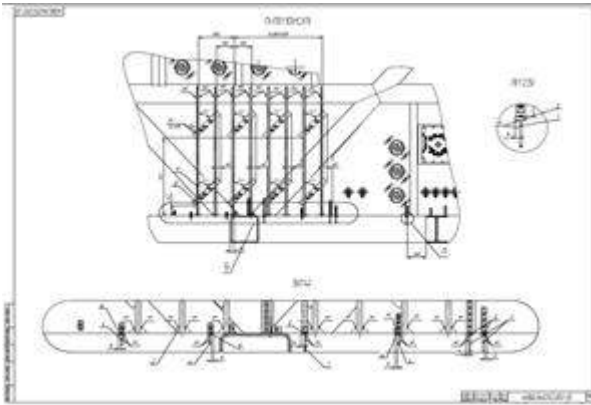


Рис. 4. Опоры системы электрогидравлики

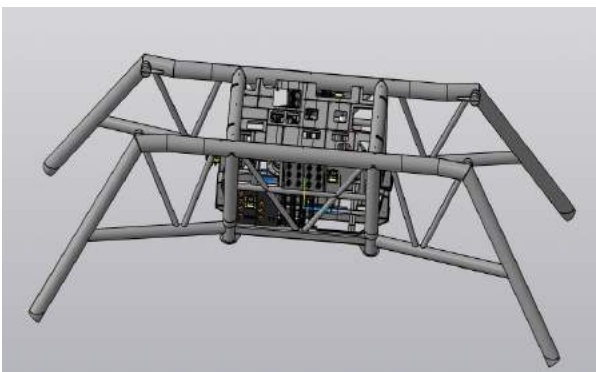


Рис. 5. Разработанная 3d-модель опытного образца манифольда

2. Расчет гидроаккумуляторов системы компенсации

Для аварийного срабатывания запорной арматуры магистрали с пластиковым продуктом (КШЛС-1, КШНЗ-1, КШНЗ-2) предназначены гидроаккумуляторы с запасенной в них гидравлической жидкостью под давлением. Данные задвижки приводятся в движение гидроцилиндрами. КШЛС-1, КШНЗ-1, КШНЗ-2 точки присоединения гидроаккумуляторов на ЭГ системе.

Исходные данные:

- рабочий объем гидроцилиндра КШЛС-1 $V_1 = 3,64$ литров;
- рабочий объем гидроцилиндров КШНЗ-1, КШНЗ-2

$V_2 = 2,25$ литра;
- количество аварийных срабатываний привода задвижек $n=3$;

- максимальное и минимальное рабочее давление $p_2 = 350$ бар, $p_1 = 100$ бар;

- максимальное и минимальное рабочие температуры $t_2 = 20$ °C, $t_1 = -2$ °C.

$$\Delta V = n \times (V_1 + 2 \times V_2), \quad (1)$$

$\Delta V = 24,5$ литров.

Для расчета необходимого объема гидравлической жидкости в гидроаккумуляторах производился анализ в программном обеспечении фирмы Parker Hannifin (Parker Olaer Accu,

www.parker.com) (рис.6). По результатам расчета минимальный объем гидроаккумуляторов составит $V_3 = 86$ литров.

Так как аккумулятора два, то объем каждого должен быть не менее 43 литров.

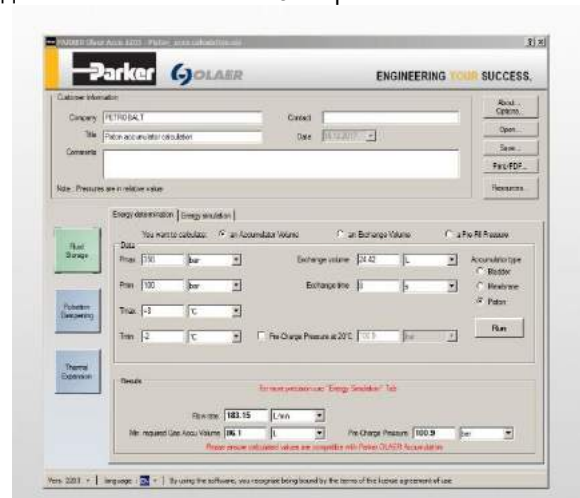


Рис. 6. Расчет поршневых гидравлических аккумуляторов в программном обеспечении Parker

3. Расчет гидроаккумуляторов системы возврата

Для накопления гидравлической жидкости из заполненных полостей гидроцилиндров предназначен гидроаккумулятор на линии слива.

Исходные данные:

- рабочий объем гидроцилиндра КШЛС-1 $V_1 = 3,64$ литров;
- рабочий объем гидроцилиндров КШНЗ-1, КШНЗ-2

$V_2 = 2,25$ литра;
- количество аварийных срабатываний привода задвижек $n=3$;

- максимальное и минимальное рабочее давление $p_2 = 40$ бар, $p_1 = 30$ бар;

- максимальное и минимальное рабочие температуры $t_2 = 20$ °C, $t_1 = -2$ °C;

- коэффициент запаса объема гидроаккумулятора $k=3$.

Объем гидравлической жидкости, запасаемой в гидроаккумуляторе

$$\Delta V = k \times n \times (V_1 + 2 \times V_2), \quad (2)$$

$\Delta V = 75$ литров.

Расчет производился в программном обеспечении фирмы HYDAK (ASPlight, www.hydak.com) (рис.7). По результатам расчета минимальный объем гидроаккумулятора

$V_3 = 167$ литров.

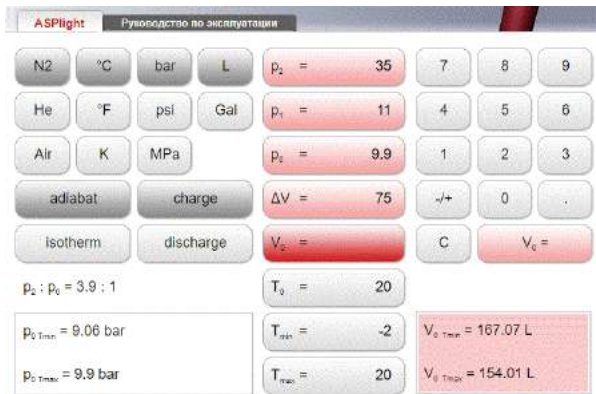


Рис. 7. Расчет баллонного гидравлического аккумулятора в программном обеспечении HYDAK

4. Расчет скоростей потока сред

Скорости потока определяются расходом потребителей. Из внутренних потребителей присутствуют гидроцилиндры приводов задвижек КШЛС-1, КШНЗ-1, КШНЗ-2. Расход внешних потребителей не определяется в данной работе.

Исходные данные:

- рабочий объем гидроцилиндра КШЛС-1
V₁ = 3, 64 литров;
- рабочий объем гидроцилиндров КШНЗ-1, КШНЗ-2
V₂ = 2, 25 литра;

- скорость движения поршня КШЛС-1, КШНЗ-1, КШНЗ-2

u = 25 мм/с;

- ход поршня КШЛС-1

h₁ = 350 мм;

- ход поршня КШНЗ-1, КШНЗ-2

h₂ = 175 мм;

- номинальный диаметр DN подводных линий

145-148

DN = 6 мм.

Расход гидроцилиндра КШЛС-1

$$Q_1 = V_1 \times u / h_1, \tag{3}$$

Q₁ = 0,26 литра/с.

Расход гидроцилиндров КШНЗ-1, КШНЗ-2

$$Q_2 = V_2 \times u / h_2, \tag{4}$$

Q₂ = 0,32 литра/с.

Скорость потока жидкости в линиях 145, 146

$$u_1 = Q_1 \times 4 / (\pi \times DN^2), \tag{5}$$

u₁ = 9,2 м/с.

Скорость потока жидкости в линиях 147, 148

$$u_2 = Q_2 \times 4 / (\pi \times DN^2), \tag{6}$$

u₂ = 11,3 м/с.

Так как подводные трубки слишком короткие (2,5-4,5 метра) гидравлическим сопротивлением можно пренебречь.

5. Расчет прочности трубы от действия давления

Определение допустимой толщины трубопровода проводится согласно Гост 32388-2013 (Трубопроводы технологические Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия) и апробированных методик, ссылающихся на данный документ.

Сплавы Инконель 625 и 316L используются в производстве труб в ЭГ системе манифольда.

Основные особенности и преимущества сплава:

- чрезвычайная стойкость против точечной, щелевой, эрозионной и межкристаллической коррозии;
- нечувствительность к вызванному хлоридами коррозионному растрескиванию от растяжения;
- хорошая стойкость против минеральных кислот, таких как азотная, фосфорная, серная и соляная кислота;
- хорошая стойкость против щелочей и органических кислот;
- хорошие механические свойства.

Основные области использования в сфере добычи нефти и газа:

- газовые трубопроводы;
- производственные трубные системы и подъемные трубы при добыче нефти;
- прибрежная промышленность;
- судостроение трубопроводы морской воды;
- трубы факелов для сжигания на нефтеперегонных заводах.

Из данных сплавов выпускают различные изделия по стандартам ASTM:

- В366 - фитинги;
- В564 - поковки;
- В704, В705 - сварные трубы;
- В751 - сварные трубы;
- В834 - трубные фланцы, фитинги, вентили;
- В924 - бесшовные сварные трубы для теплообменников и конденсаторов со встроенными ребрами [4,5].

Зная механические характеристики сплавов Инконель 625 (табл.2), а также 316L (табл. 3), расчет для труб, входящих в состав ЭГ системы, производился по сплаву с аналогичными механическими свойствами.

Таблица 2

Механические свойства сплава Инконель 625 при комнатной температуре 20 °С

Сплав	Предел прочности Rm Н/мм ²	Предел текучести Rp0.2 Н/мм	Относительное удлинение A5%	Твердость по Бринеллю НВ
Инконель 625	760	345	30	≤220

Таблица 3

Механические свойства сплава материала 316 L

Предел прочности (временное сопротивление разрыву), мин., МПа	485
Предел текучести, 0,2%, МПа	170
Твердость по Бринеллю, НВ макс, тип.	165
Усталостная прочность, N/mm ² тип.	260
Относительное удлинение, мин., %	40

В связи с тем, что изменение характерных свойств незначительны, в минимальном разбросе температур вычисления проводились при температуре 20 °С.

Сталь AISI 316L - конструкционная криогенная аустенитная сталь. Сталь 316 L имеет свойство сохранять целостность структуры при повышении и понижении температур [6-7].

Используя онлайн методику расчета [http://www.stresscalc.ru/boiler/boiler.php] и возможности отечественного производства труб согласно ГОСТ 9941-81, разработаны рекомендации по габаритным параметрам, (табл. 4 и 5).

Таблица 4

Труба бесшовная (3/4"), (3/8") согласно ГОСТ 9941-81

№ п/п	Обозначение трубы	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина труб, м
1	Труба бесшовная (3/4") 18×2 ГОСТ 9941-81;	18	2	7
2	Труба бесшовная (3/4") 18×2,5 ГОСТ 9941-81;	18	2,5	7
3	Труба бесшовная (3/4") 19×2 ГОСТ 9941-81;	19	2	7
4	Труба бесшовная (3/8") 10×2 ГОСТ 9941-81;	10	2	7

В условиях импортозамещения и необходимости минимизации конструкции в части количества покупных элементов и габаритных характеристик, расчетами подтверждена возможность следующих изменений в электрогидравлической схеме манифольда:

– линии высокого давления (поз.30-43), могут быть изменены с 5/8", 69 МПа, Инконель на 3/4", 69 МПа, Инконель, толщина 3,7 мм на следующие трубы согласно возможностям для поставки отечественного производства труб (ГОСТ 9941-81), представленные в табл. 5;

– линии низкого давления (поз.50-69), могут быть изменены с 5/8", 34,5 МПа, 316L на 3/4", 34,5 МПа, 316L, толщина 4 мм (табл. 5);

– технологическая линия ингибитора коррозии (поз.75-81), может быть заменена с 5/8", 34,5 МПа, Инконель на 3/4", 34,5 МПа, 316L, толщина 4 мм (табл. 5);

– резервная линия высокого давления (поз.85-91, 95), может быть заменена с 5/8", 69 МПа, Инконель

на 3/4", 69 МПа, Инконель, толщина 3,7 мм (табл. 5).

Таблица 5

Рекомендуемые габаритные параметры труб

№ п/п	Наименование линии	Обозначение трубы	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм
1	Линии высокого давления (поз.30-43)	Труба бесшовная (3/4") 18×3 ГОСТ 9941-81;	18	3
2	Линии низкого давления (поз.50-69)	Труба бесшовная (3/4") 18×4 ГОСТ 9941-81;	18	4
3	Технологическая линия ингибитора коррозии (поз.75-81)	Труба бесшовная (3/4") 18×4 ГОСТ 9941-81;	18	4
4	Резервная линия высокого давления (поз.85-91, 95)	Труба бесшовная (3/4") 18×3 ГОСТ 9941-81;	18	3

Согласно проведенным расчетам, рекомендуемые размеры труб, входящих в состав ЭГ системы манифольда, удовлетворяют требования по толщине и выдерживают давление на период эксплуатации [8-9].

Заключение

1. В ходе исследования разработаны, подтверждены расчетами и математическим моделированием система трубопроводов малого диаметра и шесть интерфейсных панелей с соответствующими элементами для подсоединения трубопроводов, арматуры, элементов управления подводной добычей с помощью ТНПА.

2. Исследование базировалось на основе зарубежного опыта обустройства подводных месторождений, отечественного опыта проектирования, соответствующих отраслевых нормативов и правил Морского регистра судоходства.

3. Численное обоснование принимаемых конструкторских решений, в части проектирования электрогидравлической системы манифольда, позволило оптимизировать конструкцию опытного образца, эффективно выбрать и обосновать номенклатуру покупных изделий для этапа производства подводного манифольда и последующей его установки на Южно-Киринском нефтегазоконденсатном месторождении.

Литература

1. Чулкин С.Г., Подводный добычный комплекс /С.Г. Чулкин, С.В. Михайлов, С.В. Раткина, А.А. Выдра /Актуальные проблемы морской энергетики: материалы пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. - С.65-67.
2. Чулкин С.Г., Применение подводного добычного комплекса на Российском шельфе перспективы и проблемы /С.Г. Чулкин Михайлов С.В., Раткина С.В., Выдра А.А. Труды международной конференции по судостроению и океанотехнике: Сборник статей/ СПбГМТУ, НТОС им. А.Н.Крылова. – СПб.: СПбГМТУ, 2016. - С.138-143.
3. Чулкин С.Г., Конструирование пальца цангового коннектора для ПДК /С.Г. Чулкин, А.А. Сайко, Н.А. Судаков /Корабельная энергетика: из прошлого в будущее: материалы Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. - С.412-415.
4. Нифонтов, Ю.А. Техника освоения шельфа. Подводный добычный комплекс: учеб. Пособие / Ю.А. Нифонтов, С.Г. Чулкин, В.П. Карпунина СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2017. 88 с.
5. Карпунина, В.П. Основные конструкционные особенности подводно-добычного комплекса для шельфовой добычи углеводородов //Труды Международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения-15: Третья модернизация Казахстана - новые концепции и современные решения» посвященная 120-летию М.О. Ауэзова. 2017. С. 141-145.
6. Правила и классификация постройки подводных добычных комплексов НД № 2-020301-002 [Электронный ресурс] // Российский морской регистр судоходства: [сайт]. [2018]. URL: <http://rs-class.org/ru/>; URL: <http://standartgost.ru/> (дата обращения: 12.02.2018).
7. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов НД № 2-020301-002 [Электронный ресурс] // Российский морской регистр судоходства: [сайт]. [2018]. URL: <http://rs-class.org/ru/> (дата обращения: 12.04.2018).
8. NORSOK standard: Well integrity in drilling and well operations, D-010. The competitive standing of the Norwegian off shore sector [Электронный ресурс] // NORSOKD-010: [webpage]. [2013]. URL: <http://www.iom3.org/oil-gas-division/news/2013/jul/08/refreshed-norsok-d010-launche> (дата обращения: 15.02.2018)
9. ISO 13628-4. Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems – Part4: Subsea wellhead and tree equipment. International Organization for Standardization, Geneva, 2010. 260 p.

References

1. Chulkin S.G., Mikhailov S.V., Ratkina, S.V. Vydra A.A. Podvodnyy dobychnyy kompleks. Aktual'nyye problemy morskoy energetiki: materialy pyatoy Vserossiyskoy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2016, pp.65-67.
2. Chulkin S.G., Mikhailov S.V., Ratkina S.V., Vydra A.A. Primeneniye podvodnogo dobychnogo kompleksa na Rossiyskom shel'fe perspektivy i problemy. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po sudostroyeniyu i okeanotekhnike: Sbornik statey/ SPbGMTU, NTOS im. A.N.Krylova. – SPb.: SPbGMTU, 2016, pp.138-143.
3. Chulkin SG, Saiko A.A., Sudakov N.A. Konstruirovaniye pal'tsa tsangovogo konnektora dlya PDK. Korabel'naya energetika: iz proshlogo v budushcheye: materialy Vserossiyskogo mezhotraslevogo nauchno-tekhnicheskogo foruma. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017, pp.412-415.
4. Nifontov YU.A., Chulkin S.G., Karpunina V.P. Tekhnika osvoeniya shel'fa. Podvodnyy dobychnyy kompleks: ucheb. posobie, SPb: Izd-vo SPbGMTU, 2017, 88 p.
5. Karpunina, V.P. Osnovnye konstruktсионnye osobennosti podvodnodobychnogo kompleksa dlya shel'fovoj dobychi uglevodorodov. Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoprakticheskoy konferentsii *Auehzovskie chteniya15: Tret'ya modernizatsiya Kazakhstana, novye kontseptsii i sovremennye resheniya posvyashhennaya 120 letiyu M.O. Auehzova*. 2017, pp. 141-145.
6. Pravila i klassifikatsiya postrojki podvodnykh dobychnykh kompleksov ND № 2-020301-002 (Elektronnyj resurs). Rossijskij morskoy registr sudokhodstva: (sajt). 2018. URL: <http://rs.class.org.ru/>.
7. Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh podvodnykh truboprovodov ND № 2-020301-002 (Elektronnyj resurs); Rossijskij morskoy registr sudokhodstva: (sajt). 2018. URL: <http://rs.class.org.ru/>.
8. NORSOK standard: Well integrity in drilling and well operations, D.010. The competitive standing of the Norwegian off shore sector (Elektronnyj resurs). NORSOKD-010: (webpage). 2013. URL: http://www.iom3.org.oil.gas.division.news.2013.jul.08.Refreshed_norsok.d010.launche.
9. ISO 13628.4. Petroleum and natural gas industries. Design and operation of subsea production systems. Part4: Subsea wellhead and tree equipment. International Organization for Standardization, Geneva, 2010. 260 p.

УДК 629.5.035-233.1.081.4: 629.561.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТКИ ГРЕБНЫХ ВАЛОВ

Сергей Георгиевич Чулкин

доктор технических наук, профессор
профессор кафедры технологии судового машиностроения
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Российская Федерация, 190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Алексей Леонидович Стешенков

ведущий инженер-технолог
АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»
Российская Федерация, 198095, г. Санкт-Петербург,
Промышленная ул., 7
e-mail: steshenkov@gmail.com

Александр Джалюльевич Бреки

кандидат технических наук
доцент кафедры машиноведения и основ конструирования
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого»
Российская Федерация, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
e-mail: albreki@yandex.ru

Павел Михайлович Лысенков

доктор технических наук
профессор кафедры технологии судового машиностроения
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Российская Федерация, 190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: ctr@mail.ru

Аннотация

Опыт эксплуатации морских и речных судов, показывает, что их надежность в эксплуатации в существенной степени зависит от прочности и долговечности конструктивных элементов. Это в полной степени относится к судовым гребным валам, тем более что в этом случае процесс усталостного разрушения происходит при одновременном воздействии на вал поверхностно-активной среды – морской или пресной воды.

В работе рассматривается актуальная задача моделирования процесса упрочнения гребных валов тяжело нагруженных движительных систем.

Произведен подбор оптимального размера элемента и тип решателя, оказывающих существенное влияние на сходимость решения и точность моделирования контактного взаимодействия. В результате решения задачи были рассчитаны контактные давления, напряжения и деформации, возникающие при взаимодействии вала и ролика. Для моделирования пластического течения металла получена кривая пластического течения металла, т.е. зависимость напряжения течения от степени деформации. Определены реологические свойства материала обкатываемого вала.

Для оценки влияния технологических параметров обкатки на глубину проработанного слоя и величину остаточных напряжений, была разработана трехмерная конечноэлементная модель процесса обкатки в ABAQUS.

При помощи разработанных математических моделей был выполнен расчет глубины деформированного слоя и оценка величины остаточных напряжений, возникающих при обкатке вала диаметром 40 мм.

Проведенные исследования показали, что при повышении нагрузки вероятность макроразрушения по всему сечению вала уменьшается, а вероятность выкрашивания вследствие локального разрушения в поверхностных слоях увеличивается. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния металла при обкатке не позволяют однозначно судить о влиянии технологических параметров процесса (усилие и трение) на сопротивление вала усталостному разрушению. Для количественной оценки способности вала работать в условиях циклического нагружения без разрушения требуется применение специальных испытаний и расчетов на усталостную прочность.

Ключевые слова: математическое моделирование, конечноэлементная модель, гребной вал, упрочнение, обкатка, реологическое свойство материала, деформированный слой, остаточное напряжение.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF RUNNING-IN PROPELLER SHAFTS

Sergei G. Chulkin

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of technology ship mashing building
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Alexei L. Steshenkov

process engineer
JSC «Shipbuilding and ship repair technology Center»
Russian Federation, 198095, St. Petersburg,
Industrial street, 7
e-mail: steshenkov@gmail.com

Alexander D. Breki

Saint-Petersburg state Polytechnical University
Russian Federation, 195251, St. Petersburg, ul. Polytechnic, d. 29
e-mail: albreki@yandex.ru

Pavel M. Lysenkov

the professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of technology ship mashing building
Saint-Petersburg state marine technical University
Russian Federation, 190121, St. Petersburg, 3 Lotsmanskaya street
e-mail: ctr@mail.ru

Abstract

Experience in the operation of sea and river vessels shows that their reliability in operation largely depends on the strength and durability of structural elements. This fully applies to ship propeller shafts, all the more so in this case the process of fatigue fracture occurs with simultaneous exposure of the surface-active medium — sea or fresh water — to the shaft. The paper deals with the actual task of modeling the process of hardening the propeller shafts of heavy-duty propulsion systems. The selection of the optimal size of the element and the type of solver, which have a significant impact on the convergence of the solution and the accuracy of contact interaction modeling, has been made. As a result of solving the problem, contact pressures, stresses and strains arising from the interaction of the shaft and roller were calculated. To simulate the plastic flow of a metal, a curve of plastic flow of a metal was obtained, i.e. dependence of the flow stress on the degree of deformation. The rheological properties of the material of the driven shaft are determined. To assess the impact of the technological parameters of the rolling on the depth of the worked layer and the magnitude of residual stresses, a three-dimensional finite element model of the rolling process in ABAQUS was developed. With the help of the developed mathematical models, the depth of the deformed layer was calculated and the residual stresses arising during rolling in of a shaft 40 mm in diameter were estimated.

Studies have shown that with increasing load, the probability of macrofracture over the entire cross section of the shaft decreases, and the probability of chipping due to local destruction in the surface layers increases. The results of calculations of the stress-strain state of the metal during the run-in do not allow us to unambiguously judge the influence of the technological parameters of the process (force and friction) on the resistance of the shaft to fatigue failure. To quantify the ability of the shaft to work under cyclic loading without failure requires the use of special tests and calculations for fatigue strength.

Key words: mathematical modeling, finite element model, propeller shaft, hardening, running, material rheological property, deformed layer, residual stress.

Введение

Для повышения усталостной прочности гребных валов в соответствии с действующей отраслевой документацией (ОСТ5.4097) они должны быть упрочнены методом обкатки в соответствии с ОСТ5.9049. Процесс обкатки представляет собой поверхностное пластическое деформирование — обработку давлением, при которой пластически деформируется только поверхностный слой материала детали. Цель обработки — создание определенного напряженного состояния (напряженный поверхностный наклеп) и упрочнение поверхностным наклепом.

В соответствии с ОСТ5.9049 упрочнению обкаткой подвергаются места, предназначенные для насадки облицовок, а также конус вала на участке насадки гребного винта. Схемы расположения зон обкатки представлены в ОСТ5.9049.

Величина усилия в зависимости от категории прочности и марки материала, а также диаметра вала, определяется по таблице, представленной в ОСТ5.9049.

1. Подбор оптимального размера элемента

Моделирование контактного взаимодействия между жесткими, упругими и упругопластическими телами играет важную роль при решении широкого спектра инженерных задач. Локализация напряжений

в контактной области и возможная пластическая деформация контактирующих тел делает аналитическое решение контактной задачи либо крайне сложным, либо невозможным [1]. В связи с этим для решения контактных задач часто используется метод конечных элементов, позволяющий моделировать сложное контактное взаимодействие упругопластических тел [2].

Конечноэлементные модели нуждаются в обязательной верификации, поскольку на сходимость решения и точность моделирования контактного взаимодействия сильно влияют параметры модели, в частности, размер элемента и тип решателя [3-4]. Точность расчетов конечноэлементной модели должна быть проверена путем сравнения численных результатов с экспериментальными данными. Особое значение верификация контактного взаимодействия приобретает в случае таких специфических процессов, как обкатка, которая заключается в локальной деформации поверхностных слоев.

Как правило, конечноэлементные модели контактного взаимодействия верифицируют по известным аналитическим решениям [3], поскольку выполнить экспериментальные измерения контактных напряжений затруднительно. Одно из первых аналитических решений, описывающее контакт двух упругих тел, было предложено Герцем [5]. Задача Герца заключается в расчете напряжений и деформаций, возникающих при контакте между сферами, цилиндрами, конусами и плоскими поверхностями. Многие модели контактного взаимодействия предложены на основании решения Герца [5-8].

На рисунке 1, а показана расчетная схема для случая, когда контактирующими телами являются два цилиндра длиной l и диаметрами d_1 и d_2 . Площадка контакта в этом случае представляет собой узкий прямоугольник шириной $2b$ и длиной l , а распределение давления является эллиптическим (см. рисунок 1, б).

Полуширина контактной площадки (contact half-width) может быть найдена как [9]:

$$b = \sqrt{\frac{2F \cdot (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2}{\pi l \cdot (1/d_1 + 1/d_2)}}$$

где b – полуширина контактной площадки, м; F – приложенная нагрузка, Н; ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона для материалов цилиндров; E_1, E_2 – модули упругости материалов цилиндров, Па; d_1, d_2 – диаметры контактирующих цилиндров, м; l – длина контактной площадки, м.

Максимальное контактное давление, возникающее на площадке, определяется по формуле:

$$P_{\max} = \frac{2F}{\pi b l}$$

где P_{\max} – максимальное контактное давление, Па; b – полуширина контактной площадки, м; F – приложенная нагрузка, Н; l – длина контактной площадки, м.

Распределение контактного давления на половине ширины контактной площадки может быть описано зависимостью [3]:

$$p = P_{\max} \sqrt{1 - \frac{x}{b}}$$

где p – контактное давление, Па; P_{\max} – максимальное контактное давление, Па; b – полуширина контактной площадки, м; x – текущая координата по ширине ($0 \leq x \leq b$).

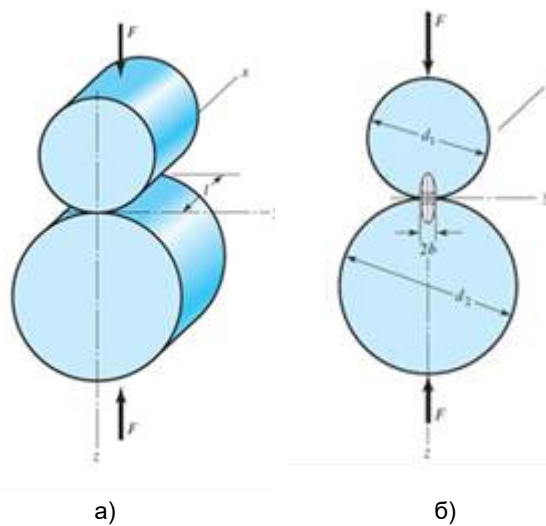


Рис. 1. Расчетная схема для определения контактных напряжений (а) и распределение контактного давления вдоль контактной площадки (б)

Задачу о контактных напряжениях при контакте ролика и вала решали численно в ABAQUS. Моделировали контактное взаимодействие ролика диаметром 150 мм и вала диаметром 40...100 мм. Использовали двумерную постановку, модель плоской деформации (plain strain). Для сравнения расчеты выполняли при помощи двух решателей – неявного (ABAQUS Implicit) и явного (ABAQUS Explicit).

Для выполнения расчетов ролик и вал разбивали на сетку конечных элементов, которую сильно сгущали в зоне контакта (рис.2). Использовали 4х-узловые четырехугольные элементы для анализа плоской деформации CPE4 (для решателя ABAQUS Implicit) и CPE4R (для решателя ABAQUS Explicit) из стандартной библиотеки элементов ABAQUS. Средний размер элемента в зоне сгущения составлял от 25 до 200 мкм.

Для материала ролика использовали упругую модель среды, свойства которой задавали модулем упругости $E = 209$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,287$. Для материала вала использовали упругую модель среды, свойства которой задавали модулем упругости $E = 200$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$.

Трение между контактирующими телами задавали по модели Кулона, согласно которой проскальзывание контактирующих поверхностей друг относительно друга происходит при выполнении условия:

$$\tau_{eq} \geq \tau_{crit}$$

где τ_{eq} – эквивалентное касательное напряжение в контактной паре, Па; τ_{crit} – критическое напряжение, Па.

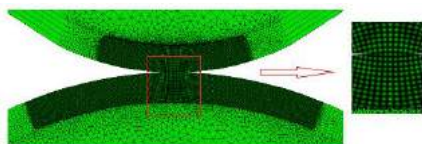


Рис. 2. Сетка конечных элементов, использованная для анализа контактного взаимодействия ролика и вала (диаметр вала 40 мм, диаметр ролика 150 мм, нагрузка 5543 Н, размер элемента в области контакта 100 мкм)

Значение критического напряжения τ_{crit} может быть определено из соотношения:

$$\tau_{crit} = \mu p,$$

где μ - коэффициент трения, безразмерный; p - контактное давление, Па.

Использовали дискретизацию контакта «поверхность — поверхность», конечное (немалое) скольжение и условие «жесткого» контакта (т.е. бесконечный рост давления при взаимопроникновении поверхностей). Роль управляющей поверхности играла контактная поверхность ролика, управляемой - валка.

В качестве граничных условий задавали нулевые перемещения центра вала, и разрешенные перемещения только в вертикальном направлении для центра ролика. Нагрузку прикладывали к оси ролика.

В результате решения задачи были рассчитаны контактные давления (рис.3), напряжения (рис.4) и деформации, возникающие при взаимодействии вала и ролика.

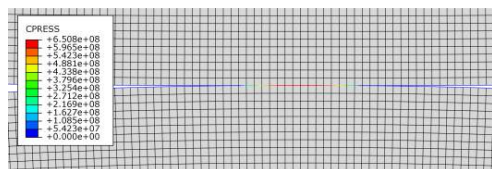


Рис. 3. Площадка контакта и контактное давление, возникающее при взаимодействии вала и ролика (диаметр вала 40 мм, нагрузка 5543 Н)

Таким образом, оптимальным по соотношению «точность расчета/процессорное время» является использование явного решателя и размера элемента в зоне контакта 50 мкм. Для этого размера элемента и решателя были выполнены дополнительные расчеты величины контактного давления при нагружении валов диаметром 40...100 мм. Результаты расчетов показывают (рис.5), что численная модель адекватно описывает контактное взаимодействие во всем диапазоне диаметров и нагрузок. Таким образом, использованная модель трения, условия контакта, тип решателя и размер элемента могут быть использованы для создания математической модели процесса обкатки.

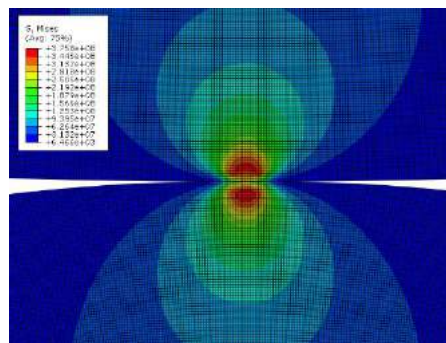


Рис. 4. Интенсивность напряжений (по Мизесу), возникающих при взаимодействии вала и ролика (диаметр вала 40 мм, нагрузка 5543 Н)

2. Определение реологических свойств материала обкатываемого вала

Для моделирования пластического течения металла необходимо располагать кривой пластического течения металла, т.е. зависимостью напряжения течения от степени деформации. Для получения кривой пластического течения непосредственно для поверхностного слоя можно использовать специальную методику [10], основанную на сочетании индентирования поверхности заготовки с последующим моделированием процесса индентирования методом конечных элементов.

Фактические испытания проводили на приборе “Hysitron TI 750 UBI” при помощи индентора типа Берковича [11]. Задавали вертикальное перемещение индентора 3 мкм и записывали кривую индентирования, т.е. зависимость усилия индентирования от перемещения индентора (рис.6). Затем выполненные испытания численно моделировали в ABAQUS. Конечнoэлементная модель процесса индентирования представлена на рисунке 7.

Кривую пластического течения рассчитывали, используя зависимость:

$$\sigma = \sigma_0 + \left(1 + \frac{E}{\sigma_0}\right) \varepsilon^n,$$

где σ - напряжение течения, Па; σ_0 - предел текучести, Па; E - модуль упругости, Па; ε - истинная деформация; n - показатель деформационного упрочнения.

Использовали следующую процедуру подбора кривой пластического течения:

- задавали предел текучести σ_0 в диапазоне 300-600 МПа и показатель деформационного упрочнения n в диапазоне 0,05...0,4;
- для заданного предела текучести и показателя деформационного упрочнения рассчитывали кривую упрочнения по уравнению;

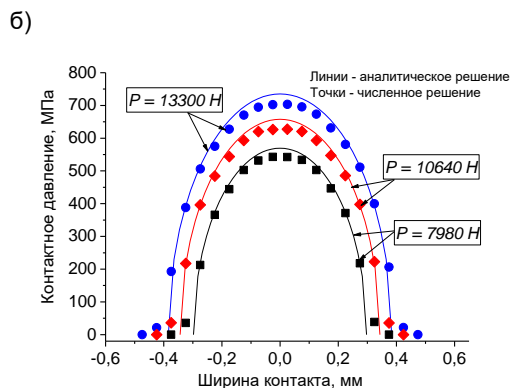
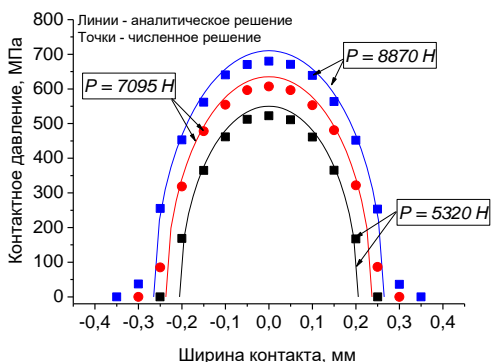
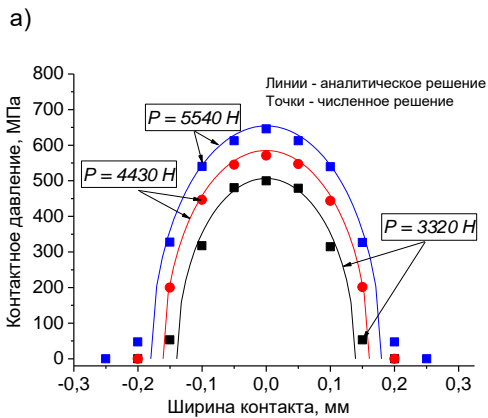


Рис. 5. Сравнение результатов расчетов распределения контактного давления аналитически и численно для нагрузки вала 40 мм (а), 60 мм (б) и 100 мм (в) различными нагрузками. Размер элемента 50 мкм, решатель ABAQUS Explicit

- рассчитанную кривую упрочнения задавали в ABAQUS как свойство материала, затем рассчитывали кривую индентирования;
 - рассчитанную кривую индентирования сравнивали с экспериментальной кривой индентирования. Сравнение осуществляли путем оценки суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений в различных точках.

На рисунке 8 представлены расчетные кривые индентирования в сравнении с экспериментальной кривой. Видно, что расчетная кривая индентирования очень чувствительна к упрочнению

материала и менее чувствительна к пределу текучести.

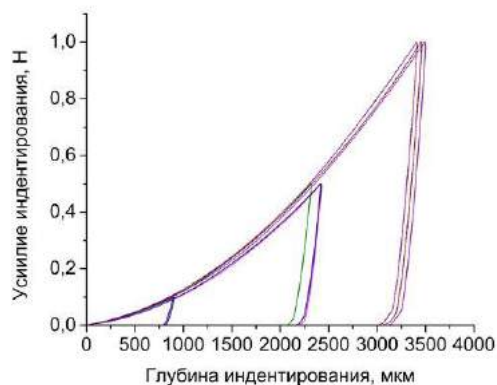


Рис. 6. Экспериментальные кривые индентирования

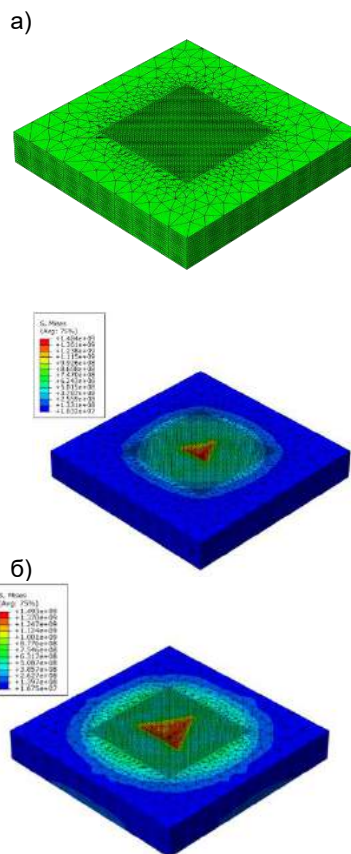
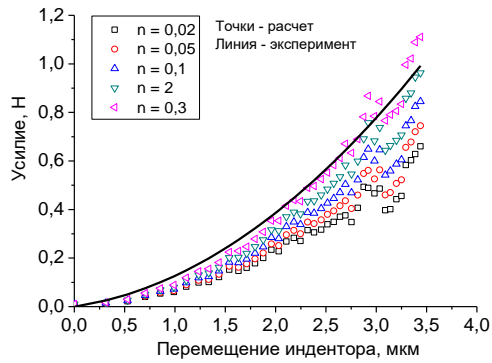
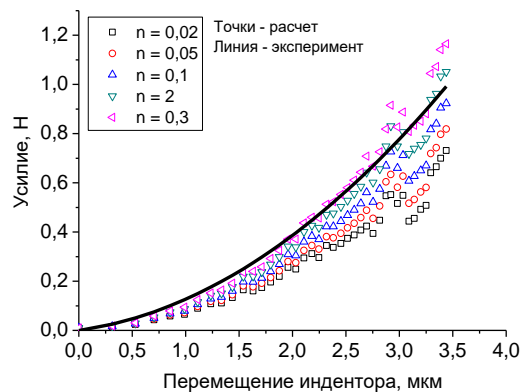


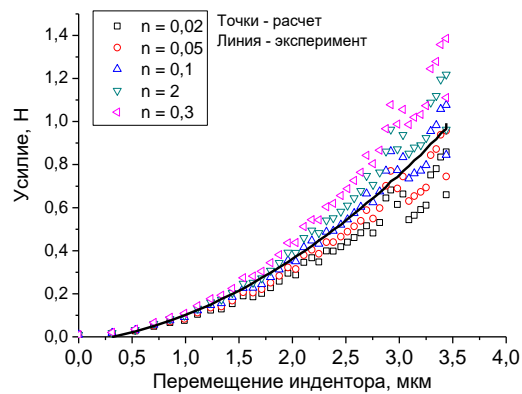
Рис. 7. Расчетная сетка образца для индентирования (а), интенсивность напряжений (по Мизесу) при погружении индентора на 2 мкм (б) и 3 мкм (в) (предел текучести индентируемого материала 500 МПа, показатель упрочнения $n = 0,2$)



а)



б)



в)

Рис. 8. Сравнение расчетных кривых индентирования, полученных для предела текучести 350 (а), 400 (б) и 500 (в) МПа и различных показателях упрочнения n , с экспериментальной кривой индентирования

Обработка результатов моделирования показала, что наименьшую сумму квадратов отклонений обеспечивает предел текучести $\sigma_0 = 350$ МПа и показатель деформационного упрочнения $n = 0,3$ (рис.9). Кривая пластического течения, соответствующая указанному пределу текучести и показателю упрочнения (см. рисунок 10) использовалась в модели обкатки.

Следует отметить, что уравнение кривой пластического течения не зависит от скорости деформации, поэтому конечноэлементная модель не может учесть влияние скорости обкатки на напряженно-деформированное состояние металла. Однако в литературе отмечается [12], что скорость обкатки слабо влияет на напряженное состояние металла. Это можно объяснить тем, что для заметного различия кривых пластического течения от скорости деформации скорость деформации должна отличаться на порядки, чего в реальном процессе обкатки не наблюдается.

3. Трехмерная модель процесса обкатки

Для оценки влияния технологических параметров обкатки на глубину проработанного слоя и величину остаточных напряжений, была разработана трехмерная конечноэлементная модель процесса обкатки в ABAQUS [13]. Модель состоит из обкатываемого вала, упрочняющего и разглаживающего роликов. Общий вид трехмерной модели представлен на рисунке 11. Вид расчетной сетки вблизи области контакта представлен на рисунке 12. Расчет выполняется в два этапа.

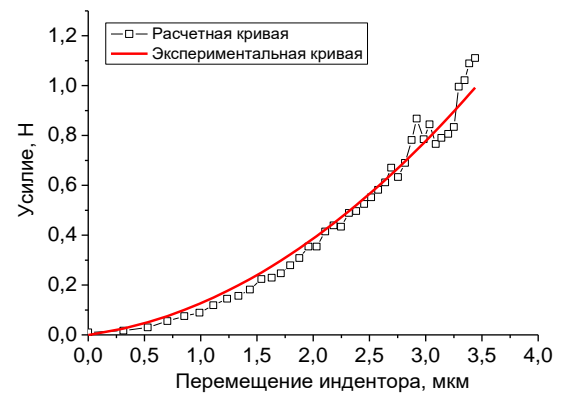


Рис. 9. Сравнение расчетной кривой индентирования для предела текучести 350 МПа и показателях упрочнения $n = 0,3$ с экспериментальной кривой

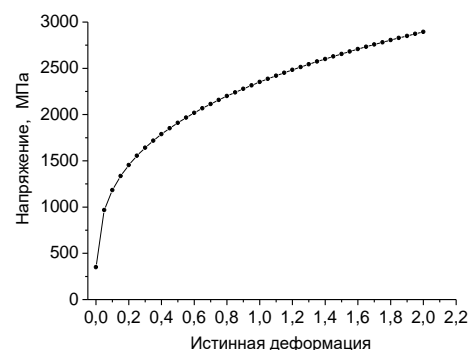


Рис. 10. Кривая пластического течения, соответствующая указанному пределу текучести и показателю упрочнения, которые использовались в модели обкатки

На первом этапе к роликам прикладывается заданное усилие, что вызывает появление контактной площадки, напряжений и деформаций (рис.13).

На втором шаге к центрам роликов прикладываются граничные условия, ограничивающие их поступательные перемещения, т.е. ролики могут только вращаться вокруг оси, совпадающей с осью вала. Для вала задаются граничные условия в виде скорости вращения вокруг своей оси и скорости поступательного перемещения вдоль своей оси. Это позволяет рассчитать напряжения и деформации как непосредственно при обкатке (рис.14 и 15), так и оценить уровень остаточных напряжений после выхода металла из очага деформации (рис.16).

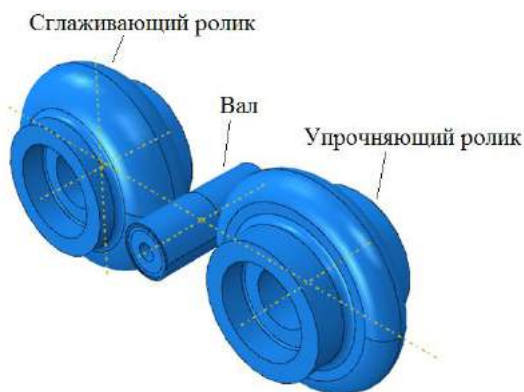


Рис. 11. Общий вид трехмерной модели процесса обкатки в ABAQUS

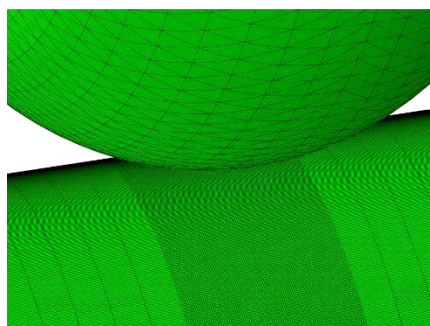
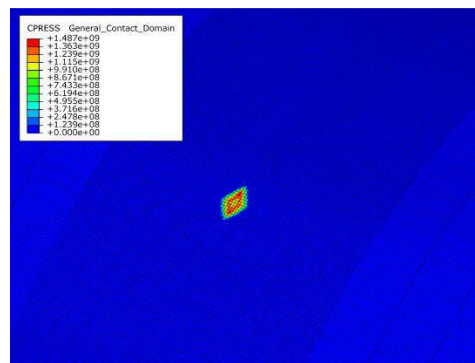


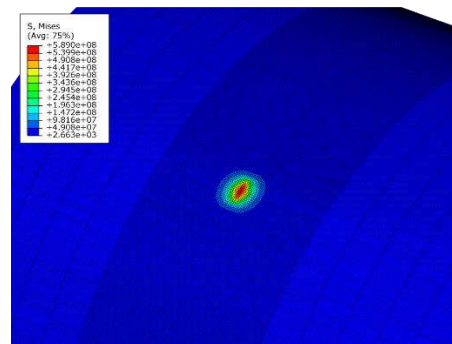
Рис. 12. Расчетная сетка на вале и разглаживающем ролике вблизи области контакта

4. Анализ глубины деформированного слоя и величины остаточных напряжений при обкатке вала диаметром 40 мм. Анализ локализации напряжений при обкатке вала с начальной шероховатостью.

При помощи разработанных математических моделей был выполнен расчет глубины деформированного слоя и оценка величины остаточных напряжений, возникающих при обкатке вала диаметром 40 мм.

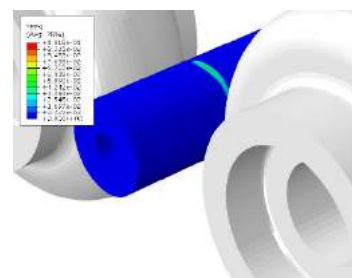


а)

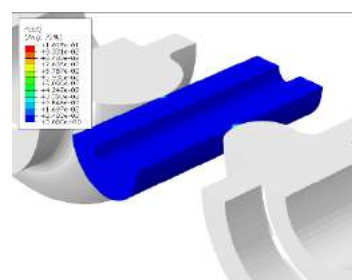


б)

Рис. 14. Контактная площадка и контактные давления (а) и интенсивность напряжений по Мизесу (б), возникающие при взаимодействии вала и упрочняющего ролика



а)



б)

Рис. 13. Интенсивность накопленной пластической деформации PEEQ в очаге деформации при обкатке вала диаметром 40 мм: а – общий вид; б – вид в разрезе

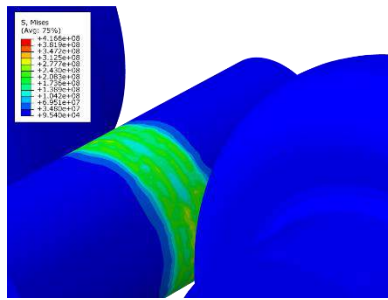


Рис. 14. Интенсивность напряжений по Мизесу в очаге деформации при обкатке вала диаметром 40 мм

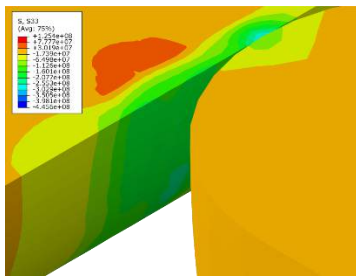


Рис. 15. Распределение тангенциальных нормальных напряжений, действующих в очаге деформации и после выхода из очага деформации

На первом этапе анализировали изменение глубины деформированного слоя от нагрузки при постоянном коэффициенте трения 0,1.

На рисунке 16 представлены расчетные зависимости изменения накопленной степени деформации в сопоставлении с экспериментальными кривыми изменения твердости по толщине обкатанного вала.

Видно, что рассчитанные глубины деформированных слоев хорошо совпадают с экспериментальными замерами твердости, что позволяет говорить об адекватности выполненных расчетов.

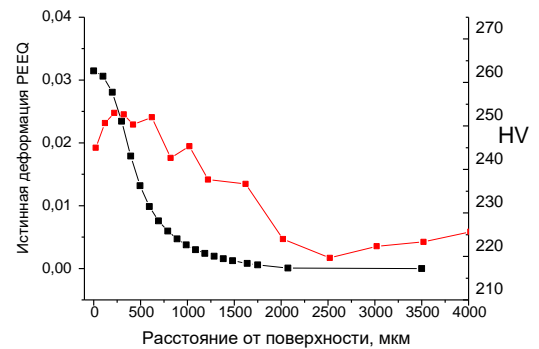
Сравнение глубины деформированного слоя в зависимости от нагрузки представлено на рисунке 17. Видно, что нагрузка значительно влияет на глубину деформированного слоя. Для нагрузки 4900 Н глубина деформированного слоя составляет 2...2,5 мм, а для нагрузки 17150 Н – приблизительно 5 мм. Следует отметить, что при увеличении нагрузки наиболее деформированными оказываются не поверхностные, а подповерхностные слои.

Из рисунка 18, а видно, что остаточные осевые напряжения на поверхности вала являются растягивающими, причем их величина возрастает с увеличением нагрузки. На глубине 200...250 мкм они переходят в сжимающие, при этом протяженность области действия сжимающих напряжений растет с увеличением нагрузки. На глубине, приблизительно равной 2...2,5 мм, осевые напряжения отсутствуют.

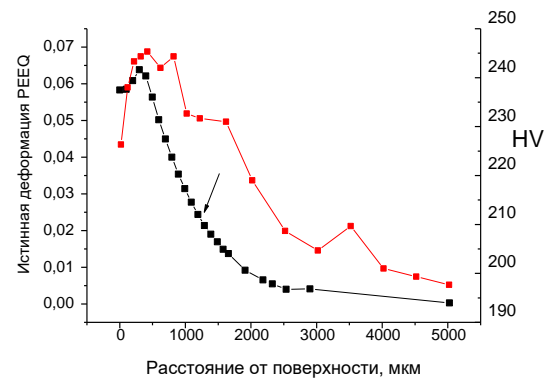
Из рисунка 18, б видно, что остаточные тангенциальные напряжения на поверхности вала, в зависимости от величины нагрузки, могут быть как сжимающими, так и растягивающими. В подповерхностных слоях в зависимости от нагрузки существует зона растягивающих напряжений и протяженная зона действия сжимающих напряжений.

При этом увеличение нагрузки приводит к значительному росту протяженности слоя подповерхностных растягивающих напряжений. Протяженность действия тангенциальных напряжений выше, чем осевых – при нагрузке 5000 Н тангенциальные остаточные напряжения действуют до глубины 2 мм, а при 1750 – приблизительно 5 мм.

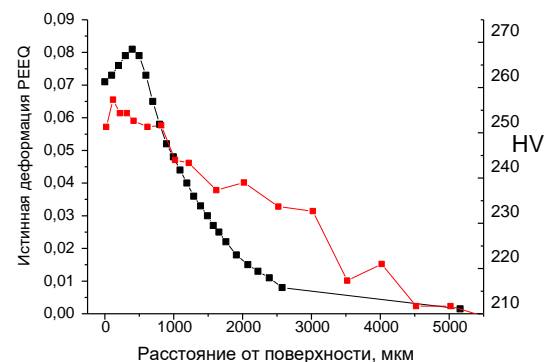
На втором этапе анализировали изменение глубины деформированного слоя от трения при постоянной нагрузке 5000 Н.



а)



б)



в)

Рис. 16. Сопоставление расчетных зависимостей изменения накопленной степени деформации с экспериментальными кривыми изменения твердости по толщине обкатанного вала при нагрузке: а – 4900 Н, б – 7350 Н, в – 17150 Н

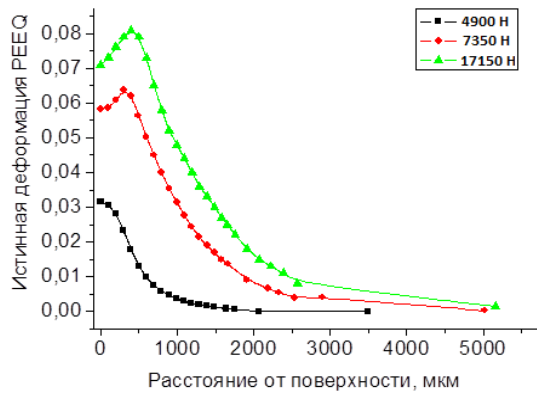
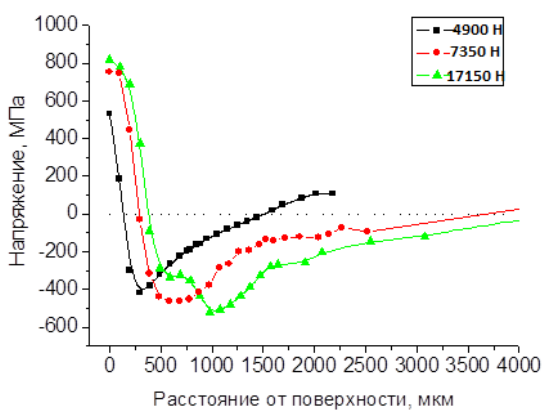
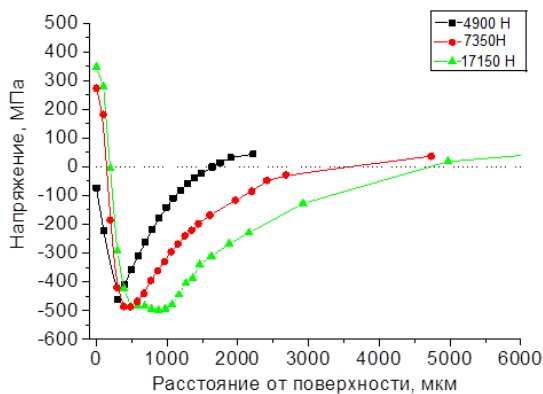


Рис. 17. Кривые изменения накопленной деформации по глубине обкатанного вала для различных нагрузок



а)



б)

Рис. 18. Распределение осевых (а) и тангенциальных (б) нормальных остаточных напряжений в зависимости от расстояния от поверхности обкатанного вала для различных нагрузок

На рисунке 19 представлены расчетные зависимости изменения накопленной степени деформации по толщине вала в зависимости от коэффициента трения. На рисунке 20 представлены зависимости изменения остаточных напряжений в зависимости от нагрузки. Видно, что глубина деформированного слоя практически не изменилась. При этом большое отличие в накопленной деформации наблюдается для поверхностного слоя толщиной 150...200 мкм. Аналогичная картина наблюдается для остаточных напряжений. Таким

образом, увеличение коэффициента трения способствует повышению сжимающих напряжений и увеличению накопленной деформации, но только для очень узкого поверхностного слоя.

Реальный процесс обкатки сопровождается деформацией неровностей поверхности обкатываемого вала, что и приводит к уменьшению шероховатости и улучшению качества поверхности. Для анализа процесса деформации микронеровностей была разработана специальная двумерная модель. На части обкатываемого вала был нанесен рельеф, имитирующий исходную шероховатость (рис.21) со средней высотой неровности 8 мкм. Средний размер элемента расчетной сетки вала в приконтактной области составил 3...4 мкм.

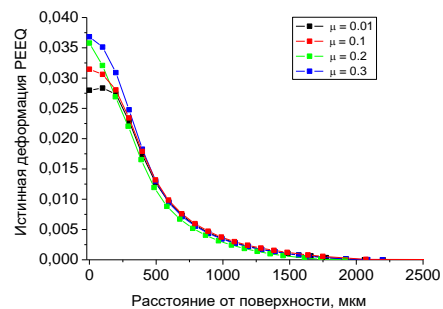
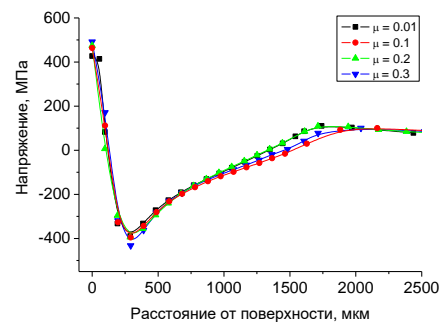
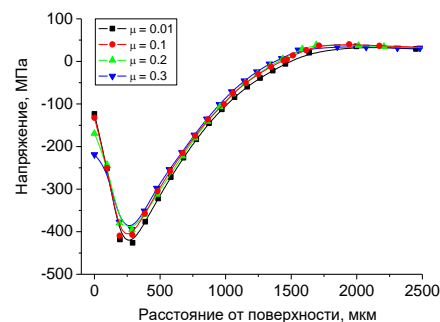


Рис. 19. Зависимость глубины деформированного слоя от коэффициента трения при обкатке вала диаметром 40 мм с усилием 4900 Н



а)



б)

Рис. 20. Распределение осевых (а) и тангенциальных (б) нормальных остаточных напряжений по толщине деформированного слоя

Это позволило уточнить напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев металла при обкатке [14]. Расчеты показали (см.рис.21), что осевые и тангенциальные напряжения для обкатанного участка с начальной шероховатостью крайне неравномерны, в отличие от участка без исходной шероховатости, на котором остаточные напряжения равномерны по всей длине. Интенсивная деформация микронеровностей вызывает сильную неравномерность полей остаточных напряжений. На отдельных участках величина остаточных напряжений на глубине до 10 мкм может превышать значения 1000 МПа, что в разы превышает напряжения для участка без начальной шероховатости.

Локализацию напряжений необходимо учитывать при измерении остаточных напряжений методом дифракции рентгеновских лучей. Результаты таких измерений на глубине до 10 мкм могут носить случайный характер в зависимости от попадания или непопадания рентгеновского пучка в область локализации напряжений. Кроме того, напряжения и деформации при обкатке проникают на глубину до 5 мм, поэтому напряжения в тонком поверхностном слое толщиной 10 мкм не характеризуют процесс обкатки.

Заключение

В целом анализ изменения характера распределения и величины остаточных напряжений влияния от нагрузки не позволяет сделать однозначных выводов об улучшении или ухудшении сопротивления обкатанного вала усталостному разрушению. С одной стороны, по мере роста нагрузки уровень растягивающих напряжений на поверхности обкатанного вала (как осевых, так и тангенциальных) повышается, что увеличивает вероятность зарождения усталостной трещины на поверхности вала. Однако вероятность зарождения трещины может и снижаться вследствие деформационного упрочнения металла в поверхностном слое и повышения его предела текучести.

С другой стороны, увеличение нагрузки приводит к увеличению протяженности зоны сжимающих напряжений в подповерхностных слоях обкатанного вала и повышение их абсолютных значений. Известно, что сжимающие напряжения препятствуют развитию усталостных трещин, поэтому повышение нагрузки обкатки должно снизить вероятность развития трещины вглубь вала. Трещины, зародившиеся на поверхности металла, будут развиваться только в поверхностных слоях.

Таким образом, при повышении нагрузки вероятность макроразрушения по всему сечению вала уменьшается, а вероятность выкрашивания вследствие локального разрушения в поверхностных слоях увеличивается. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния металла при обкатке не позволяют однозначно судить о влиянии технологических параметров процесса (усилие и трение) на сопротивление вала усталостному разрушению. Для количественной оценки способности вала работать в условиях циклического нагружения без разрушения требуется применение специальных испытаний и расчетов на усталостную прочность.

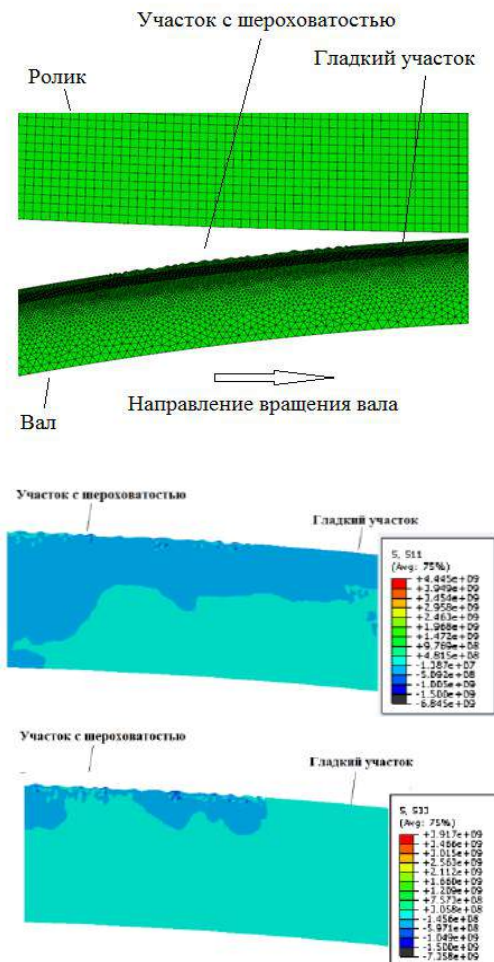


Рис. 21 – Распределение осевых (а) и тангенциальных (б) нормальных остаточных напряжений для участков с начальной шероховатостью и без начальной шероховатости (диаметр вала 40 мм, нагрузка 4900 Н)

Литература

1. X. Dong et al. Local contact behavior between elastic and elastic-plastic bodies // International Journal of Solids and Structures. — 2018.
2. H. Ghaednia et al. A comprehensive study of the elasto-plastic contact of a sphere and a flat // Tribology International. — №Volume 93, Part A, — 2016. — p. 78-90.
3. W. Siswanto et al. Contact Pressure Prediction Comparison Using Implicit and Explicit Finite Element Methods and the Validation with Hertzian Theory // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering. — №15, — Issue 06.

4. H. Blum et al. Semi-smooth Newton methods for mixed FEM discretizations of higher-order for frictional, elasto-plastic two-body contact problems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. — №309, — 2016. — p. 131-151.
5. K. Johnson One Hundred Years of Hertz Contact // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. — №196, — issue 1. — 1982. — p. 363-378.
6. R. Jackson, I. Green A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact against a Rigid Flat // *Journal of Tribology*. — №127, — 2005. — p. 343-354.
7. I.Etsion, Y.Kligerman, Y.Kadin Unloading of an elastic-plastic loaded spherical contact // *International Journal of Solids and Structures*. — №42, — issue 13. — 2005. — p. 3716-3729.
8. M. Majeed, A.Yigit, A.Christoforou Elastoplastic contact/impact of rigidly supported composites // *Composites Part B: Engineering*. — №43, — issue 3. — 2012. — p. 1244-1251.
9. R.Jackson I. Green A statistical model of elasto-plastic asperity contact between rough surfaces // *Tribology International*. — №39, — issue 9. — 2006. — p. 906-914.
10. R.G. Budynas, K.J. Nisbett Shigley's Mechanical Engineering Design (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering); 10th Edition — 2015.
11. P. Sartkulvanich et al. Finite Element Modeling of Hard Roller Burnishing: An Analysis on the Effects of Process Parameters Upon Surface Finish and Residual Stresses // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. — №129, — 2007.
12. M.M. Khrushchov, E.S. Berkovich Methods of Determining the Hardness of Very Hard Materials: The Hardness of Diamond // *Industrial Diamond Review*. — №11, — 1951. — p. 42-49.
13. M.H. El-Axir, M.M. El-Khabeery Influence of Orthogonal Burnishing Parameters on Surface Characteristics for Various Materials // *Journal of Materials Processing Technology*. — issue 132. — 2003. — p. 82-89.
14. F.Klocke, J.Liermann Roller burnishing of hard turned surfaces // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — №38, — issue 5-6. — 1998. — p. 419-423.

References

1. X. Dong et al. Local contact behavior between elastic and elastic-plastic bodies. *International Journal of Solids and Structures*. 2018.
2. H. Ghaednia et al. A comprehensive study of the elasto-plastic contact of a sphere and a flat. *Tribology International*. 2016. 93 (A). pp. 78-90.
3. W. Siswanto et al. Contact Pressure Prediction Comparison Using Implicit and Explicit Finite Element Methods and the Validation with Hertzian Theory. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*. 15 (06).
4. H. Blum et al. Semi-smooth Newton methods for mixed FEM discretizations of higher-order for frictional, elasto-plastic two-body contact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2016. 309. pp. 131-151.
5. K. Johnson One Hundred Years of Hertz Contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1982. 196 (1). pp. 363-378.
6. R. Jackson, I. Green A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact against a Rigid Flat. *Journal of Tribology*. 2005. 127. pp. 343-354.
7. I.Etsion, Y.Kligerman, Y.Kadin Unloading of an elastic-plastic loaded spherical contact. *International Journal of Solids and Structures*. 2005. 42 (13). pp. 3716-3729.
8. M. Majeed, A.Yigit, A.Christoforou Elastoplastic contact/impact of rigidly supported composites. *Composites Part B: Engineering*. 2012. 43 (3). pp. 1244-1251.
9. R.Jackson I. Green A statistical model of elasto-plastic asperity contact between rough surfaces. *Tribology International*. 2006. 39 (9). pp. 906-914.
10. R.G. Budynas, K.J. Nisbett Shigley's Mechanical Engineering Design (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering). 10th Edition. 2015.
11. P. Sartkulvanich et al. Finite Element Modeling of Hard Roller Burnishing: An Analysis on the Effects of Process Parameters Upon Surface Finish and Residual Stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007.129..
12. M.M. Khrushchov, E.S. Berkovich Methods of Determining the Hardness of Very Hard Materials: The Hardness of Diamond. *Industrial Diamond Review*. 1951. 11. pp. 42-49.
13. M.H. El-Axir, M.M. El-Khabeery Influence of Orthogonal Burnishing Parameters on Surface Characteristics for Various Materials // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. 132. pp. 82-89.
14. F.Klocke, J.Liermann Roller burnishing of hard turned surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998. 5-6. pp. 419-423.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 621.431

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДВС

Дмитрий Сергеевич Ватолин

аспирант

Государственный университет морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова

198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: hohol23rus@mail.ru

Аннотация

В последнее время ведущие мировые компании занимающиеся двигателестроением направляют свои усилия на создание систем позволяющих уйти от выполнения технического обслуживания по план-графику к обслуживанию дизельного двигателя по его текущему техническому состоянию. В качестве решения этой задачи создаются системы способные собирать и обрабатывать данные полученные от системы управления двигателем и передавать их производителю в режиме реального времени, так же предоставляя возможность удаленной диагностики системы.

В статье произведен обзор современных систем контроля технического состояния судовых двигателей внутреннего сгорания, а так же представлены их концептуальные схемы. Приведены последние разработки мировых лидеров в области двигателестроения. Дана оценка последним технологиям в области мониторинга в режиме реального времени. Произведена оценка тенденций в области совершенствования автоматизации и контроля двигателей внутреннего сгорания за последние годы.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, техническое состояние, техническое обслуживание, автоматизация, контроль рабочих параметров, удаленный доступ, техническая поддержка, отчет о техническом состоянии.

TECHNICAL CONDITION MONITORING SYSTEMS OF SHIP'S ICE

Dmitry S. Vatolin

post-graduate student

of State University of Maritime and River Fleet named after adm. S. O. Makarov

198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7

e-mail: hohol23rus@mail.ru

Abstract

Recently, the world's leading engine-building companies have been directing their efforts towards creating systems that allow them to withdraw from maintenance according to the schedule in order to maintain the diesel engine according to its current technical condition. As a solution to this problem, systems are created that are able to collect and process data received from the engine control system and transfer it to the manufacturer in on-line mode, also providing the ability to remotely diagnose the system.

The article reviews modern control systems for the technical condition of marine internal combustion engines, as well as presents their conceptual schemes. The state-of-the art solutions of world leaders in the field of engine construction are discussed. An assessment of the latest technologies in the field of on-line monitoring has been given. An assessment of trends in the improvement of automation and monitoring of internal combustion engines in recent years has been carried out.

Keywords: internal combustion engine, technical condition, maintenance, automation, control of operating parameters, remote access, technical support, technical status report.

Введение

Современные двигатели постоянно развиваются, и этот процесс развития ставит все новые и новые задачи перед системами автоматизации и контроля рабочих параметров.

Согласно статистических данных приведенных в [1], уровень контролируемых процессов у дизельных двигателей с каждым годом стремительно растет. Общие тенденции изменения уровня автоматизации и контроля судовых дизелей представлены на рис. 1.



Рис. 1. Тенденции изменения уровня автоматизации и контроля судовых ДВС за последние годы

Контролем технического состояния современных дизельных двигателей занимаются микропроцессорные системы управления (МПСУ). В настоящее время многие дизелестроительные фирмы, включая «Wartsila - система RCOM», «MAN Diesel & Turbo SE - система CoCoS», «Caterpillar MAK - система DICARE» и другие, оборудуют выпускаемые двигатели измерительными приборами и микро-процессорами, на которые возлагается задача контроля и мониторинга наиболее важных параметров, сигнализации об их выходе за установленные пределы и накопления информации для отслеживания развития параметров во времени. При этом вся работа осуществляется в автоматическом режиме. В ряде конструкций на микропроцессор также возложена функция управления процессами подачи топлива в целях оптимизации работы двигателя применительно к режимам его работы. Помимо постоянного отслеживания рабочих параметров двигателя (температура отработавших газов, давление в рабочем цилиндре и т.д.), современные МПСУ способны контролировать и корректировать рабочие процессы, воспринимая дискретные сигналы термпар и пьезо-электрических датчиков, оцифровывая их и посредством программного аппарата изменяя через органы управления соотношение топливо/воздух и т.п.

Помимо всего, современные МПСУ посредством соединения Internet в режиме реального времени передают собранные с двигателя и обслуживающих его систем данные заводу производителю, обеспечивая тем самым постоянный доступ ко всей информации сервисной службе, а так же помогая в сборе статистических данных по двигателю, столь необходимых инженерам-конструкторам для его дальнейшего совершенствования.

1. Обзор современных систем контроля технического состояния двигателя

Фирма «Wartsila» разработала программу управления системой технического обслуживания для двухтактных двигателей Sulzer (RCOM-CBM - Condition Based Maintenance). При разработке ставилась задача оптимизировать баланс между

увеличенными сроками моточисток, сокращением расходов на запасные части и высокой надежностью двигателя в эксплуатации. Накопленный опыт эксплуатации практически одинаковых двигателей показал, что стоимость их технического обслуживания и надежность работы различны. Это естественно и объясняется различием факторов, влияющих на состояние каждого двигателя. При эксплуатации двигателей используются разные по типу топлива и смазочные масла, запасные части разных производителей, а также имеет место различие в нагрузках, уровне повседневного технического обслуживания и моточисток.

Анализ случаев серьезных аварийных повреждений компонентов двигателя показал, что задолго до поломки была возможность по меняющемуся состоянию двигателя (компонента) предупредить деградацию состояния двигателя и его компонентов и, тем самым, предупредить следующую поломку. Чтобы решить эту задачу, фирма прибегла к использованию знаний привлеченных экспертов (специалистов) для систематического анализа доступной информации. Это открыло возможность предугадывать возникающие проблемы и предупреждать резкое ухудшение технического состояния. К настоящему моменту изучение опыта эксплуатации большого числа судовых силовых установок позволило специалистам сервисного отдела фирмы приобрести необходимые знания и идеальную возможность предугадывать состояние двигателей.

В целях дальнейшего совершенствования системы обслуживания фирма организовала сбор знаний экспертов, работающих во всех представительствах мира, и на этой основе создала единую базу данных. Часть этих данных относится непосредственно к конкретному судну, к числу которых относятся результаты стендовых и ходовых испытаний, данные, записанные в электронной форме и взятые из отчетов сервисных инженеров фирмы и данные рабочих характеристик двигателя, фиксируемые на протяжении всей его эксплуатации (data log). Совместная обработка материалов экспертной системы и системы сбора информации позволяет в автоматическом режиме выработать заключения по состоянию конкретного двигателя.

Система сбора информации автоматически пополняется данными, фиксируемыми системой автоматического контроля за работой двигателя, и вручную судовыми механиками путем занесения данных в персональный компьютер. В целях систематизации и повышения эффективности сбора данных разработаны соответствующие шаблоны.

Предлагается производить измерения и оценку состояния следующих элементов: поршней, сальников поршневых штоков, воздухоснабжения, продувки, сгорания, топливных насосов высокого давления и форсунки, распределительного вала и клапанов, приводов, коленчатого вала, системы управления, демпферов.

Система сбора включает также данные о состоянии таких важных компонентов, как поршневые кольца, втулки цилиндров подшипники

ит.п. Небезынтересно отметить, что использование шаблонов и компьютера существенно сокращает бумажные отчеты, зачастую перегружающих обслуживающий персонал.

Процесс компьютеризированной обработки включает три этапа:

- Подсчет собранных данных и построение тренда;
- Состояние двигателя оценивается путем сопоставления взвешенных известных случаев, имеющихся в экспертной базе данных фирмы;
- Результат оценки состояния двигателя и его элементов, а также рекомендации по организации технического обслуживания сообщаются старшему механику судна и в техническую службу судоходной компании.

Рекомендации выдаются в виде графиков, картинок и сопровождающего их текста.

В четырехтактных двигателях фирма «Wartsila» давно использует автоматизированные комплексы контроля состояния - WECS (Wartsila Engine Control System) [2]. Сегодня по желанию заказчика они дополняются новой системой FAKS (Fault Avoidance Knowledge System), программное обеспечение которой служит целям предупреждения поломок, отслеживания тренда изменения состояния и рекомендациями по внесению изменений в организацию технического обслуживания. Главным образом система осуществляет диагностирование ситуации, когда поломка (отказ) еще не произошла, но измерения показывают, что двигатель работает не оптимальным образом и надвигается критическая ситуация. По своей идеологии внедренные системы технического обслуживания по состоянию на 4-х и 2-х тактных двигателях идентичны.

Система обслуживания «по состоянию» собирает и обрабатывает все ежедневно поступающие данные, осуществляя их «нормализацию» - приведение к стандартным внешним условиям и заданной нагрузке. Затем, как это уже объяснялось ранее, нормализованные данные сопоставляются с эталонными - определяются значения отклонений и по ним оценивается состояние двигателя и обслуживающих его систем.

Если отклонения укладываются в заданные пределы - окно на мониторе окрашивается в черный цвет. Если отклонения слегка выходят за эти пределы - окно желтое. Если отклонения существенно выше - окно красное и поступает тревожный сигнал.

Центром технического обслуживания в судоходную компанию и на судно ежемесячно направляется отчет с комментариями и рекомендациями, отражающими состояние установки на текущий момент, прогноз на будущее и исторический обзор изменений состояния с момента начала работы системы.

Аналогичную систему управления - SaCoS_{one}, предоставляет компания MAN Diesel & Turbo SE. Концептуальная схема системы SaCoS_{one} представлена на рис. 2.

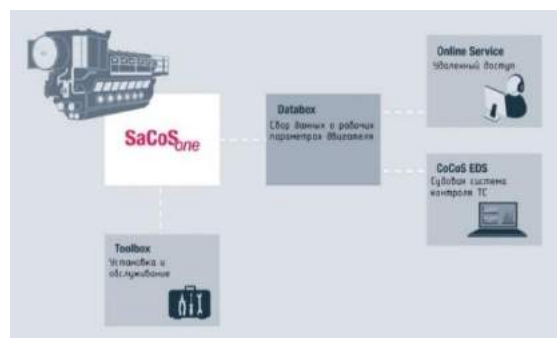


Рис. 2. Концептуальная схема системы SaCoS_{one}

Помимо управления рабочими процессами двигателя система SaCoS_{one} собирает и хранит в блоке памяти (Databox) данные полученные с различных датчиков, установленных на двигателе. Из блока памяти эти данные могут быть доступны как для системы дистанционной поддержки от производителя, так и для судовой системы контроля технического состояния (ТС) и планирования технического обслуживания (ТО) – CoCoS-EDS. Программа CoCoS-EDS (Computer Controlled Surveillance - Engine diagnostics system) разработана специально для наблюдения за дизельным двигателем, оценки его эффективности и диагностики неисправностей [3]. Интерфейс системы CoCoS-EDS предстален на рис. 3.

Система CoCoS-EDS содержит в себе программу CoCoS Maintenance, которая позволяет снизить затраты на эксплуатацию дизельных двигателей за счет улучшения планирования и оптимизации процедур ТО. CoCoS Maintenance - это многопользовательская система, позволяющая различным пользователям планировать, выполнять и сообщать о различных задачах обслуживания [4]. В ее основные функции входит: эффективно планировать профилактические и корректирующие работы; помогать выполнять ТО на основе условий; создание комплексных заказов на работу; распределение и использование ресурсов отчета; управление ЗИП; обработка документации, требуемой классификационными обществами.

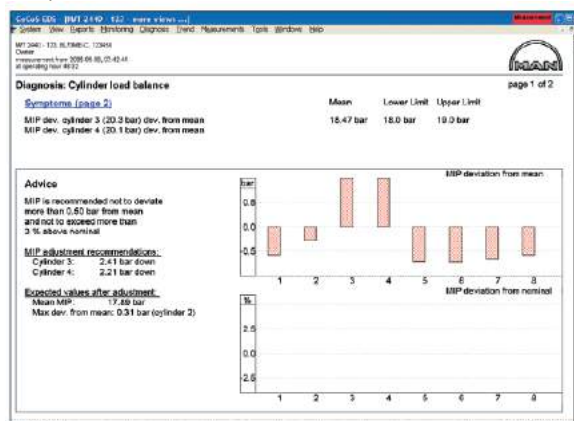


Рис. 3. Интерфейс системы CoCoS-EDS

Интерфейс программы CoCoS Maintenance представлен на рис. 4.

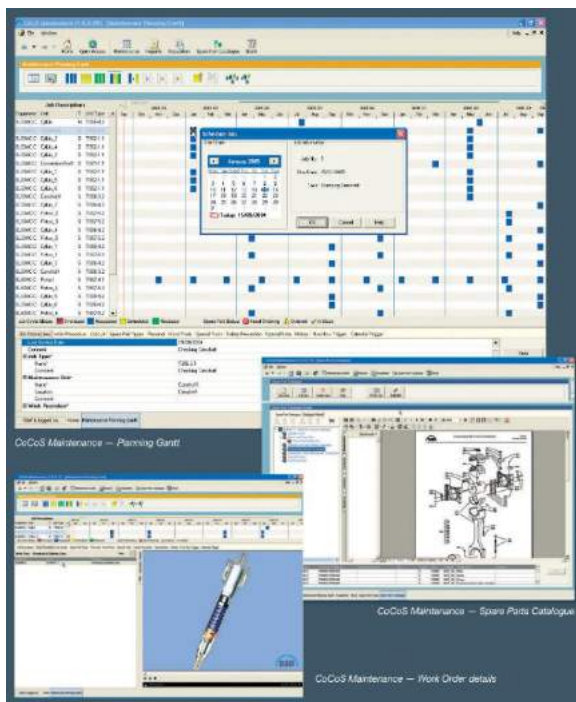


Рис. 4. Интерфейс программы CoCoS Maintenance

Система удаленного доступа позволяет производителю напрямую подключаться к системе управления двигателем, производить мониторинг его ТС в режиме реального времени, осуществлять контроль состояния самой системы управления, а так же дистанционно корректировать работу отдельных модулей. Для защиты канала связи между производителем и судном в системе используется двухсторонний Firewall, а так же применяется технология VPN (Virtual Private Network - виртуальная частная сеть). Концептуальная схема системы удаленного доступа представлена на рис. 5.



Рис. 5. Концептуальная схема системы удаленного доступа

На основании данных полученных за счет системы удаленного доступа, в конце каждого месяца для каждого двигателя формируется отдельный отчет, который включает в себя [5]: наработку двигателя за месяц, контроль нагрузки на двигателя, обороты двигателя, обороты турбокомпрессора (ТК), давление охлаждающей воды, важные замечания от производителя, а так же рекомендации по эксплуатации.

Заключение

Современные системы контроля ТС судовых дизелей тесно связаны с их системами автоматизации и контроля. Текущие тенденции в области организации эксплуатации и ТО говорят об дальнейшем увеличении уровня общения и обмена информацией между судовым персоналом, судовладельцем и заводом-изготовителем двигателя, а так же о расширении функций дистанционной технической поддержки в режиме реального времени. Все эти меры направлены на оптимизацию периодов ТО и уменьшение затрат при эксплуатации и ремонте двигателя, за счет исключения преждевременных выводов дизеля из работы и своевременного обслуживания предупреждающего серьезную поломку.

Литература

1. SaCoS_{one}. The future of Engine Automation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://primeserv.man-es.com/docs/librariesprovider5/primeserv-documents/man-sacosone.pdf?sfvrsn=12> (дата обращения: 16.10.2018).
2. RT-flex training. Function of the RT-flex control system WECS-9520. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://hmstc.or.kr/file/BBS1/40_RT-flex_Control-System%20Rev01.pdf (дата обращения: 16.10.2018).
3. CoCoS EDS. Engine diagnostics system, off-line version. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/cocos-eds.pdf?sfvrsn=3> (дата обращения: 16.10.2018).
4. CoCoS Maintenance. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://engine.od.ua/ufiles/CoCoS_Maintenance_www.engine.od.ua.pdf (дата обращения: 16.10.2018).
5. Online Service. More safety for your engines. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://primeserv.man-es.com/docs/librariesprovider5/Online_Service/online-service.pdf?sfvrsn=12 (дата обращения: 16.10.2018).

References

1. SaCoS_{one}. The future of Engine Automation. – <https://primeserv.man-es.com/docs/librariesprovider5/primeserv-documents/man-sacosone.pdf?sfvrsn=12>
2. RT-flex training. Function of the RT-flex control system WECS-9520. – http://hmstc.or.kr/file/BBS1/40_RT-flex_Control-System%20Rev01.pdf
3. CoCoS EDS. Engine diagnostics system, off-line version. – <https://www.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/cocos-eds.pdf?sfvrsn=3>
4. CoCoS Maintenance. – http://engine.od.ua/ufiles/CoCoS_Maintenance_www.engine.od.ua.pdf
5. Online Service. More safety for your engines. – https://primeserv.man-es.com/docs/librariesprovider5/Online_Service/online-service.pdf?sfvrsn=12

УДК 614.84.621.3:614.842/.847: 614.842/.844: 614.842/.894

ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ДЫМА ПРИ ПОЖАРАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОМЕЩЕНИЙ СУДОВ (КОРАБЛЕЙ)

Андрей Дмитриевич Ищенко

кандидат технических наук,
профессор кафедры пожарной тактики и службы
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. E-mail: adinko@mail.ru

Владимир Васильевич Роевко

кандидат технических наук, профессор
профессор кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. E-mail: piroemail@bk.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор
директор ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13. E-mail: malygin_com@mail.ru

Артем Игоревич Соковнин

кандидат технических наук
преподаватель-методист факультета подготовки научно-педагогических кадров
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4. E-mail: sokovninartem88@ya.ru

Аннотация

Этой работой авторский коллектив продолжает освещение возможностей технологии получения водных сред в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС). В статье представлено теоретическое и экспериментальное обоснование способа осаждения дыма с помощью технологии ВСМФС применительно к судовым условиям. Описаны механизмы осаждения, реализуемые в установке осаждения аэрозолей водой в метастабильном фазовом состоянии (УОА ВМФС).

Тушение пожаров в условиях недостаточной видимости представляет собой особую опасность из-за высокого риска получения травм и гибели людей. В данной статье приводится теоретическое и экспериментальное обоснование возможного применения способа осаждения аэрозолей водой в метастабильном фазовом состоянии.

Проведено исследование механизмов осаждения аэрозолей, натурным экспериментом подтверждена эффективность осаждения продуктов горения устройством осаждения аэрозолей.

Описаны задействованные механизмы осаждения и экспериментально доказана эффективность осаждения продуктов горения в УОА ВМФС. Полученные результаты и дальнейшие исследования позволят усовершенствовать конструкцию УОА ВМФС, реализующую способ осаждения аэрозолей в процессе тушения пожара для улучшения видимости в задымленных помещениях.

На основании теоретических и экспериментальных исследований показана возможность создания переносного и стационарного технического средства, реализующего осаждение продуктов горения в задымленном помещении, что позволит снизить воздействие опасных факторов пожара на людей. Устройство может быть перемещено силами двух человек. Экспериментально доказано, что УОА ВМФС даже с учетом ослабления света от парокапельной среды увеличивает свето-пропускную способность среды при осаждении продуктов горения, тем самым позволяет улучшить видимость в задымленном судовом помещении. Проведен сравнительный эксперимент при подаче холодной воды (без образования паровой фазы), исключая процесс нуклеации, который показал на возможность улавливания большей части продуктов горения.

Ключевые слова: пожар, судовая (корабельная) энергетическая установка, водная среда, взрывное вскипание, метастабильное фазовое состояние, активация, коагуляция, пар, конденсация.

PROSPECTS AND POSSIBILITIES OF SMOKE DEPOSITION IN CASE OF FIRES OF POWER PLANTS AND VESSELS (SHIPS)

Andrey D. Ishchenko

Cand.Tech.Sci., the professor of DEPARTMENT OF FIRE FIGHTING MANAGEMENT AND SERVICE OF
ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366
e-mail: adinko@mail.ru

Vladimir V. Roenko

the professor, Cand.Tech.Sci., the professor of DEPARTMENT OF FIRE AND RESQUE TECHNOLOGY OF ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366
e-mail: piroemail@bk.ru

Igor G. Malygin

the professor, Dr.Sci.Tech., director of THE INSTITUTE OF TRANSPORT PROBLEMSN.S.SOLOMENKO OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
12-ya liniya VO, 13 (4th floor), Saint-Petersburg, 199178
e-mail: malygin_com@mail.ru

Artem I. Sokovnin

Cand.Tech.Sci.,
lecturer-methodologist of the department of preparation of scientific and pedagogical personnel OF ACADEMY OF THE STATE FIRE SERVICE OF EMERCOM OF RUSSIA
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366. e-mail: sokovninartem88@ya.ru

Abstract

With this work, the team of authors continues to highlight the possibilities of the technology of obtaining aqueous media in a metastable phase state (VSMFS). The article presents a theoretical and experimental rationale for the method of smoke deposition using VSMFS technology as applied to ship conditions. The deposition mechanisms implemented in the installation of the deposition of aerosols with water in a metastable phase state are described. (VOA VSMFS).

Putting out fires in conditions of insufficient visibility is a particular danger due to the high risk of injury and death. This article provides a theoretical and experimental rationale for the possible application of the method of deposition of aerosols with water in a metastable phase state.

A study of the mechanisms of aerosol deposition was carried out, and the effectiveness of the products of combustion was confirmed by a field experiment using a VSMFS aerosol deposition device.

The mechanisms involved in the deposition are described and the efficiency of the deposition of combustion products in the WWS AOM is experimentally proved. The results obtained and further research will improve the design of the Navy AOM, which implements the method of deposition of aerosols in the process of extinguishing a fire to improve visibility in smoke-filled rooms.

On the basis of theoretical and experimental studies, the possibility of creating a portable and stationary technical equipment that implements the deposition of combustion products in a smoke filled room is shown, which will reduce the impact of dangerous fire factors on people. The device can be moved by two people. It has been experimentally proven that the AOM of the Navy, even taking into account the attenuation of light from the vapor-droplet medium, increases the light-throughput capacity of the medium during the deposition of combustion products, thereby improving visibility in a smoky room. A comparative experiment was conducted with cold water supply (without formation of the vapor phase), thereby excluding the nucleation process, which showed that it was not possible to catch most of the combustion products.

Key words: fire, vessel (ship) power plant, water environment, explosive effervescence, metastable phase state, activation, coagulation, steam, condensation, electrical installation.

Введение

Проблема задымления в судовых условиях наиболее остро проявляется при пожарах энергетических установок судов (кораблей) [1-4]. Анализ пожаров на объектах, связанных с превращением одного вида энергии в другую показал, что распространение данных видов пожаров характеризуются интенсивным образованием черного дыма, так как большая часть пожаров (более 50 %) (Рисунок 1) сопровождается горением материалов производных от нефти (изоляция кабелей, горючие жидкости) [5].



Рисунок 1 – Распределение пожаров по горючим материалам и средний прямой материальный ущерб

от одного пожара на объектах, связанных с превращением одного вида энергии в другую

Следует отметить два основных вида горючей нагрузки характерных для помещений с энергоустановками – это изоляция токоведущих частей и горючие жидкости. Их объединяют общие пожароопасные свойства: в разы превышающая удельная скорость выгорания и дымообразующая способность по сравнению с деревом и бумагой (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Пожароопасные свойства характерной горючей нагрузки для объектов, связанных с превращением одного вида энергии в другую

Горючие жидкости являются топливом, находятся в трансформаторах, в подшипниковых узлах турбин, в маслопроводах, их количество даже на небольших судах оценивается тоннами. Известно, что при горении турбинного масла на площади 5 м² в течение 5 минут приводит к снижению видимости до 1 метра в машинном зале объемом более 8000 м³ [6]. Поэтому пожары на объектах, связанных с превращением одного вида энергии в другую в замкнутых объемах с участием данных видов горючих нагрузок, происходит в условиях сильного задымления даже при учете небольшой площади горения и большого объема помещения.

1. Возможности осаждения дыма при пожарах помещениях энергетических установок и других отсеках судов

В статьях [7,8] изложено обоснование необходимой дальности видимости при тушении пожара в условиях задымления и рассмотрены недостатки применяемых способов улучшения видимости в дыму. Предложен способ осаждения дыма с помощью технологии ВСМФС и принципиальная рабочая схема технического средства для его реализации.

Для изготовления установки осаждения аэрозолей (УОА) ВМФС были проведены теоретические и практические исследования в области науки изучающие: эволюцию аэрозольных систем (нуклеация, конденсация, коагуляция), механизмы осаждения аэрозолей, истечения воды с различными параметрами (давление, температура) из сопел.

В современных работах выделяют наиболее значимые механизмы осаждения: диффузионный механизм, термофорез, турбофорез, диффузиофорез, гравитационное осаждение [9, 10]. Данные механизмы вносят определенный вклад в суммарную скорость осаждения аэрозоля, но в зависимости от внешних условий (температура, давление, влагосодержание газовой среды) и характеристик аэрозоля (размер, масса, химические и физические свойства) вклад каждого механизма осаждения будет различен. В общем виде формулу скорости осаждения аэрозолей можно записать как:

$$V_{\text{сумм}} = V_{\text{д}} + V_{\text{тм}} + V_{\text{тб}} + V_{\text{дф}} + V_{\text{г}} \quad (1)$$

где $V_{\text{д}}$ – скорость осаждения аэрозоля за счет диффузионных сил; $V_{\text{тм}}$ – скорость осаждения аэрозоля за счет термофореза; $V_{\text{тб}}$ – скорость осаждения аэрозоля за счет турбофореза; $V_{\text{дф}}$ – скорость осаждения аэрозоля за счет диффузиофореза; $V_{\text{г}}$ – скорость осаждения аэрозоля за счет сил гравитации.

Необходимо учитывать, что реальный диапазон размеров дымовых частиц лежит в широком диапазоне от ультрадисперсных (0,001 мкм – первичные продукты горения) до грубодисперсных (более 10 мкм – агломераты сажи) получаемых в результате реального пожара [11,12]. Поэтому для быстрого выведения продуктов горения из взвешенного состояния, необходимо задействовать все механизмы осаждения, причем работающих одновременно. Самые простые в реализации

механизмы осаждения аэрозоля – это гравитационный и инерционный (турбофорез). Известно, что вклад данных механизмов в скорость осаждения растет только при размерах частиц аэрозолей более 5 мкм. Поэтому для этого необходимо создать условия быстрой коагуляции дымовых частиц (увеличение размеров и массы частиц за счет их соударения между собой и других аэрозолей).

Быстрая коагуляция согласно теории Смолуховского будет достигнута, когда количество слипаний равняется количеству столкновений. В реальности столкновение капель воды с частицами дыма не всегда приводит к поглощению каплей воды дымовой частицы, это обусловлено силой поверхностного натяжения и гидрофобностью аэрозоля. Эту проблему может решить паровая фаза. За счет конденсации и коагуляции кластеров воды будет образовываться капли воды, центрами конденсации, которых являются дымовые частицы.

В работах, изучающих гетерогенную нуклеацию описаны условия, при которых будет протекать безбарьерно процесс образования водной пленки на центрах конденсации. Одно из основных условий процесса нуклеации – это объем пресыщенным паром [13]:

$$\zeta = \frac{n}{n_{\infty}} - 1 \quad (2)$$

где n – объемная плотность числа молекул пара, n_{∞} – объемная плотность числа молекул насыщенного пара. При $-1 < \zeta < 0$ – стабильное состояние пара; $0 < \zeta < \zeta_{\text{тб}}$ – метастабильное состояние пара; $\zeta > \zeta_{\text{тб}}$ – нестабильное состояние пара; $\zeta_{\text{тб}}$ – пороговое значение пара, выше которого гетерогенная нуклеация протекает безбарьерно.

В результате гетерогенной нуклеации образуется на ядре конденсации водная пленка (Рисунок 3) за счет захвата дымовой частицей кластеров воды.

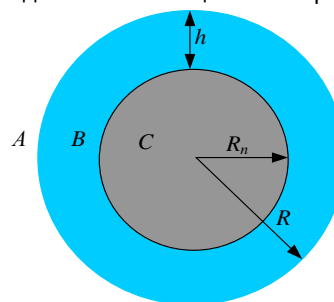
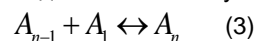


Рисунок 3 – Начальная стадия зарождения из пара капли радиуса R на смачиваемом ядре радиуса R_n : h – толщина жидкой пленки; фазы: А – газ; В – жидкость; С – твердое тело

В настоящее время в теории нуклеации существуют различные математические модели представляющие процесс образования кластеров.

Классическая теория (представлена работами Френкеля, Зельдовича, Майера) исходит из того, что кластеры увеличивают свой размер за счет присоединения единичных молекул:



где A_1 – одна молекула; A_n – кластер из n молекул.

Также современные работы рассматривают различные математические модели, которые предусматривают, что в процессе конденсации участвуют кластеры, которые увеличиваются за счет присоединения других кластеров, а не одиночных молекул. Описывают данный процесс с помощью ряда Фибоначчи или геометрической прогрессии.

В объеме, где созданы условия для протекания нуклеации (пресыщения паром) будут образоваться кластеры воды с размерами от $2,9 \cdot 10^{-4}$ мкм (диаметр молекулы воды), что на порядок меньше, чем размер дымовых частиц. Можно предположить, что кластеры воды воспринимают дымовые частицы как поверхность, на которой происходит процесс конденсации, скорость которой зависит от влагосодержания воздуха, температуры самой частицы аэрозоля и окружающей среды.

Таким образом, при введении струи ВСМФС (струя состоит из капельной и паровой фаз) [14] в замкнутое пространство, заполненное дымовыми частицами, активизируются процессы конденсации, нуклеации и коагуляции дымовых частиц с паром, кластерами и каплями воды. Затем, когда полученный аэрозоль достигнет достаточных размеров (более 10 мкм) под действием гравитационных сил произойдет осаждение дымовых частиц (Рисунок 4).



Рисунок 4 – Схема процессов, протекающих в аэрозольной системе пар-кластер воды-вода-дымовая частица

Ускорение процесса осаждения дымовых частиц может быть достигнуто за счет уменьшения объема и задействования инерционного механизма осаждения. Для этого необходимо техническое средство, в корпус которого будут одновременно поступать продукты горения и ВСМФС. Что позволит увеличить суммарную скорость осаждения за счет: увеличения турбулентного движения в корпусе устройства (турбофорез); конденсация пара на стенках корпуса (диффузия); разность температур дымовых частиц и аэрозоля воды, корпуса устройства (термофорез); соударение укрупненного аэрозоля о зеркало жидкости (ударно-инерционный механизм). Также численно возрастет количество частиц дыма, паровой фазы, кластеров воды и капель воды в объеме, что увеличит вероятность столкновения частиц между собой.

При создании данного технического средства было решено использовать энергию выходящей струи для вращения рабочего вала. Это позволило повысить мобильность технического средства, что очень важно в процессе тушения пожара. Приводом для вращения вала с установленной крыльчаткой

использовали гидротурбину, работающую на принципе Сегнерова колеса. На основе имеющихся работ наиболее подходящим соплом для работы гидропаровой турбины для данного технического устройства, оказалось сопло типа Лавалья [15, 16]. Для нахождения необходимых параметров недогретой воды, подводимой к соплам Сегнерова колеса, необходимо было решить гидродинамическую задачу, с изобарным истечением воды с различной температурой (160...260 °С) из сопла Лавалья. Решение гидродинамической задачи, дало ответ на сложившееся противоречие - с одной стороны для дымоосаждения необходимо максимально перенасытить объем паром, с другой стороны должны обеспечить достаточный крутящий момент (тяговое усилие струи) для обеспечения производительности УОА. Так как при изобарном процессе повышение температуры приводит к увеличению паровой фазы, но уменьшает тяговое усилие струи.

Для решения данной задачи произведено математическое моделирование в программном комплексе CFD ANSYS CFX. Истечение воды из сопла сопровождается интенсивными фазовыми переходами, что необходимо учитывать при построении расчетной модели. В результате моделирования были определены основные характеристики потока: массовые доли пара и воды, скорость истечение, давление и реактивное усилие струи: возможный рабочий диапазон недогретой воды подаваемой к УОА ВСМФС при входном давлении 2 МПа, наиболее подходящий диапазон температуры воды 180-200 °С.

2. Обработка результатов экспериментов подавления дыма водой в метастабильном фазовом состоянии

В дальнейшем были проведены натурные испытания целью которых было оценить технические характеристики УОА и эффективность осаждения дымовых частиц. Эксперимент проводился в три этапа.

На первом этапе определяли количество оборотов крыльчатки УОА в минуту с помощью лазерного тахометра Sinometer DT2234. При подаче недогретой воды (0,47 кг/с) с параметрами: давление 2 Мпа и температура 180 °С, обороты крыльчатки составили 1400 об/мин. Так как использовалась крыльчатка от стандартного дымососа ДЭП-7, то можно предположить, что производительность УОА составила 0,5...0,8 м³/с или 1800...2880 м³/ч.

Второй этап эксперимента проводили для получения данных по осаждению частиц дыма при подаче воды с параметрами P=2 МПа T=20 °С. В данном случае фиксировали, как будет осажаться дымовые частицы при реализации механизмов осаждения: захват частиц дыма крупной каплей воды и ударно-инерционное осаждение (соударение потока о зеркало жидкости). Источником продуктов горения была ручная дымовая граната (РДГ-2Ч), генерирующая черный дым. При горении РДГ-2Ч температура продуктов горения составляла более 400 °С (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Работа УОА с параметрами подаваемой воды: $P=2$ МПа; $T=20$ °С

Для регистрации эффективности осаждения дыма был установлен у выходящих отверстий УОА прибор для измерения оптической плотности среды. Ток, регистрируемый с фотодиода во время горения РДГ-24 и работы УОА при подаче недогретой воды с параметрами $T=20$ °С и $P=2$ Мпа, показан на графике (Рисунок 6).

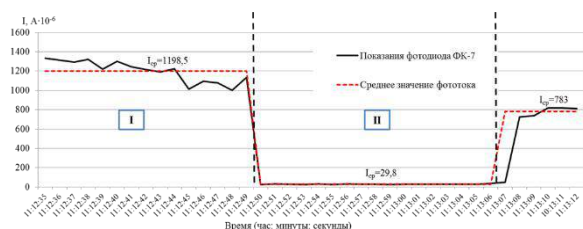


Рисунок 6 – График изменение оптической плотности при осаждении аэрозоля от РДГ-24

Условно график можно разбить на две составляющих. Первая часть – это вырабатываемый фототок до поджога РДГ-24. Вторая часть – это вырабатываемый фототок при прохождении не осевших в УОА продуктов горения.

Визуально было зафиксировано, что при реализации механизмов осаждения, таких как захват частиц дыма крупной каплей воды и ударно-инерционное осаждение не принесло результата (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Работа УОА с параметрами воды: $T=20$ °С; $P=2$ МПа

Третий этап эксперимента проводили для получения данных по осаждению частиц дыма при реализации следующих процессов: нуклеация паровой фазы (образование кластеров воды), захват дымовыми частицами кластеров воды, коагуляция

дымовых частиц между собой в турбулентном потоке, захват более крупной каплей коагулированных дымовых частиц, ударно-инерционное осаждение за счет соударения смеси о зеркало жидкости. Для этого к УОА подводили недогретую воду с параметрами $T=180$ °С и $P=2$ МПа. Остальные условия эксперимента оставались неизменными.

Результат изменения тока, регистрируемый с фотодиода, приведен на графике (Рисунок 8).



Рисунок 8 – График изменение фототока в процессе работы УОА (с параметрами воды $P=2$ МПа; $T=180$ °С) и осаждения продуктов горения от дымовой шашки РДГ-24

Первый участок изменение фототока при выходе установки на рабочий режим (регистрируется изменение светопропускаемости среды из-за выхода пароконденсатной среды), второй и четвертый участок изменение фототока при работе УОА без горения РДГ-24 (Рисунок 9, 10).

Третий участок – это изменение оптической плотности газовой среды, выходящей из УОА при осаждении продуктов горения от РДГ-24 (Рисунок 9).



Рисунок 9. Работа УОА с параметрами воды: $T=180$ °С; $P=2$ МПа

Визуально зафиксировано, что при работе УОА с параметрами воды $P=2$ МПа; $T=180$ °С происходило осаждение продуктов горения от РДГ-24. При более интенсивном горении РДГ-24 выходила темно-серая смесь (паро-капельная среда с продуктами горения).

Ослабление светового потока, на основе показаний фотодиода при горении РДГ-24 и осаждении продуктов горения УОА с различными параметрами представлено в таблице (Таблица 1).

Таблица 1

Изменение оптической плотности при работе УОА

Параметры воды (Т, °С; Р, МПа)	Среднее значение фототока, при осаждении продуктов горения	Прошедший световой поток (%)
20; 2	29,8 (А-10-6)	2,5
180; 2	68,6 (А-10-6)	5,7

Следует учесть, что во втором случае ослабление света происходит в два этапа: ослабление при прохождении света через паро-капельную среду (ослабление в 4,7 раза от фонового светового потока); ослабление света при прохождении через паро-капельную среду и продукты горения (ослабление в 3,7 раза по отношению к силе света, проходившей через паро-капельную смесь).

Заключение

При проведении указанных экспериментов было установлено, что теоретические и

экспериментальные исследования показали возможность создания переносного технического средства, реализующего осаждение продуктов горения в задымленном судовом помещении, что позволит снизить воздействие ОФП на людей. Устройство может быть перемещено силами двух человек. Экспериментально доказано, что УОА ВМФС даже с учетом ослабления света от парокапельной среды увеличивает светопропускную способность среды при осаждении продуктов горения, тем самым позволяет улучшить видимость в задымленном помещении. Проведен сравнительный эксперимент при подаче холодной воды (без образования паровой фазы) тем самым, исключая процесс нуклеации, который показал не возможность улавливания большей части продуктов горения.

Данные исследования проводились при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК».

Литература

- Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Fire hazards and fire extinguishing features of power plants and compartments of ships // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 1 (39) V. 1 2018. P. 86-94. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
- Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G., Komashinsky V.I. Innovations in fire extinguishing of energy installations and vessels (ships) // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (40) V. 2 2018. P. 73-80. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
- Ishchenko A.D., Chistjakov T.I., Malygin I.G., Visloguzov V.V. Electric protection in fire extinguishing of class E energy installations and premises of vessels (ships) // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (40) V. 2 2018. P. 81-89. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
- Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Experiments of fire exhaustion of energy installations and compartments of vessels (ships) with aqueous medium by volumetric method // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 3 (41) V. 2 2018. P. 128-134. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
- Пожары и пожарная безопасность в 2014 году [Текст]: статистический сборник / Под общей редакцией А.В. Матюшина. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2015. – 124 с.
- Микеев, А. К. Противопожарная защита АЭС [Текст] / А.К. Микеев – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
- Соковнин, А.И. Осаждения дыма на объектах энергетики температурно-активированной водой [Текст] / А.И. Соковнин, В.В. Роевко, А.Д. Ищенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация: научный журнал. – 2016. – №1. С. 54-59
- Соковнин А.И. Условия видимости для пожарных в задымленной зоне при тушении пожаров на объектах энергетики [Электронный ресурс] / А.И. Соковнин, А.Д. Ищенко, В.Д. Федяев // Технологии техносферной безопасности. – 2016. - № 3(67). – 5 с. - Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/26-03-16.ttb.pdf>
- Алипченков, В.М. Верификация моделей осаждения продуктов деления в первом контуре на маломасштабных экспериментах в расчетном комплексе СОКРАТ [Электронный ресурс] / В.М. Алипченков, А.Е. Киселев, С.В. Цаун // 7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск.: ОКБ «ГИДРОПРЕСС» – 2011. – 13 с. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-041.pdf>
- Alipchenkov V.M., Kiselev A.E., Strzhov V.F., Tsaun S.V., Zaichik L.I.. Advancement of modeling deposition and coagulation of aerosols in nuclear reactor. Nuclear Engineering and Design 239(2009) 641-647
- Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. 228 – с.
- Кулев, Д.Х. Опасность продуктов горения полимерных материалов [Текст] / Обзорная информация Сер. «Пожарная безопасность». – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. – 22 с.
- Куни, Ф.М. Теория гетерогенной нуклеации в условиях постепенного создания метастабильного состояния пара [Текст] / Ф.М. Куни, А.К. Щекин, А.П. Гринин // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, №4. – С. 345–385.
- Роевко, В. В. Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокапельными струями воды [Текст] / А. В. Пряничников, В. В. Роевко, Е. Б. Бондарев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2015. – № 4. – С. 7 – 12.
- Болотнова, Р.Х. Пространственное моделирование нестационарной стадии истечения вскипающей жидкости из камер высокого давления [Текст] / Р.Х. Болотнова, В.А. Бузина // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 343-352.

16. Мильман, О.О. Исследование характеристик течения вскипающей жидкости в соплах Лавалья [Текст] / О.О. Мильман, А.А. Дахнович, Д.И. Демичева, А.С. Голдин, В.Н. Кольцов // Юбилейный сборник трудов научно-исследовательского центра Калужского турбинного завода – Калуга: Манускрипт. – 2002 – С. 218-228.

References

1. Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Fire hazards and fire extinguishing features of power plants and compartments of ships // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 1 (39) V. 1 2018. P. 86-94. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
2. Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G., Komashinsky V.I. Innovations in fire extinguishing of energy installations and vessels (ships) // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (40) V. 2 2018. P. 73-80. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
3. Ishchenko A.D., Chistjakov T.I., Malygin I.G., Visloguzov V.V. Electric protection in fire extinguishing of class E energy installations and premises of vessels (ships) // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 2 (40) V. 2 2018. P. 81-89. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
4. Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Experiments of fire exhaustion of energy installations and compartments of vessels (ships) with aqueous medium by volumetric method // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 3 (41) V. 2 2018. P. 128-134. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
5. Fire and fire safety in 2014 [Text]: statistical compilation / Edited by A.V. Matyushina. - M.: FGU VNIPO EMERCOM of Russia, 2015. - 124 p.
6. Mikeev, A. K. Fire protection of nuclear power plants [Text] / A.K. Mikeev - M.: Energoatomizdat, 1990. - 432 p.
7. Sokovnin, A.I. Smoke Deposits at Energy Facilities with Temperature-Activated Water [Text] / A.I. Sokovnin, V.V. Roenko, A.D. Ishchenko // Fire and emergency situations: prevention, elimination: a scientific journal. - 2016. - №1. Pp. 54-59
8. Sokovnin A.I. Conditions of visibility for firefighters in the smoke-filled zone while extinguishing fires at power facilities [Electronic resource] / A.I. Sokovnin, A.D. Ischenko, V.D. Fedyaev // Technosphere Safety Technologies. - 2016. № 3 (67). - 5 p. Access mode: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-3/26-03-16.ttb.pdf>
9. Alipchenkov, V.M. Verification of deposition models of fission products in the first circuit on small-scale experiments in the SOKRAT computational complex [Electronic resource] /
10. V.M. Alipchenkov, A.E. Kiselev, S.V. Caun // 7th ISTC "Safety Assurance of NPPs with VVER", Podolsk: OKB "GIDROPRESS" - 2011. - 13 p. - Access mode: <http://www.gidropress.podols.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-041.pdf>
11. Khmelev, V.N. Ultrasonic coagulation of aerosols: monograph [Text] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, K.V. Shalunova, S.N. Tsyganok, R.V. Barsukov, A.N. Slivine; Alt. state tech. Univ, BTI. - Biysk: Publishing house Alt. state tech. University, 2010. 228 - p.
12. Kulev, D.H. Danger of combustion products of polymeric materials [Text] / Survey information. Ser. "Fire safety". - M.: VNIPO USSR Ministry of Internal Affairs, 1983. - 22 p.
13. Cooney, F.M. Theory of heterogeneous nucleation under conditions of gradual creation of a metastable state of vapor [Text] / F.M. Cooney, A.K. Shchekin, A.P. Grinin // Successes of physical sciences. - 2001. - T. 171, №4. - pp. 345–385.
14. Roenko, V. V. Quenching the spills of oil and oil products with metastable vapor-droplet water jets [Text] / A. V. Pryanichnikov, V. V. Roenko, E. B. Bondarev // Fire and emergency situations: prevention, liquidation. - 2015. - № 4. - pp. 7 - 12.
15. Bolotnova, R.Kh. Spatial modeling of non-stationary stage of expiration of boiling liquid from high-pressure chambers [Text] / R.Kh. Bolotnova, V.A. Elderberry // Computational mechanics of continuous media. - 2014. - Vol. 7, No. 4. - Pp. 343-352.
16. Milman, O.O. Study of the characteristics of the flow of boiling liquid in Laval nozzles [Text] / O.O. Milman, A.A. Dakhnovich, D.I. Demicheva, A.S. Goldin, V.N. Koltsov // Anniversary Collection of Works of the Research Center of the Kaluga Turbine Plant - Kaluga: Manuscript. - 2002 - pp. 218-228.

УДК 621.822.1, 539.621

СНИЖЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕЖИМА СУХОГО ТРЕНИЯ ОСЕВЫХ ГАЗОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ПУСКАХ И ОСТАНОВКАХ ТУРБОМАШИН**Олеся Сергеевна Портнова**

Старший преподаватель кафедры Судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Матвей Валерьевич Грибиниченко

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: korabel23@list.ru

Наталья Владимировна Куценко

Старший преподаватель кафедры Судовой энергетики и автоматики
Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: tatka_i@list.ru

Андрей Валерьевич Нитяговский

Заместитель директора ДВФ – главный инженер
НИПТБ «Онега»
692801, г. Большой Камень. ул. Лебедева, 1
e-mail: nitiagovsky@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы снижения продолжительности работы осевого газового подшипника в режиме сухого трения путем частичной замены его режимом газовой смазки. Анализ проводился методом сравнения нагрузочных характеристик осевых газовых подшипников (зависимости несущей способности от величины смазочного зазора при различных режимных и конструктивных параметрах).

Нагрузочные характеристики осевых подшипников получены с помощью математической модели и составленной на ее основе программы. Рассматриваются осевые подшипники с профилированием рабочих поверхностей в виде клиновидных участков.

Полученные значения максимумов коэффициента несущей способности и соответствующих значений оптимальных параметров позволяют разработчику, не прибегая к специальному программному обеспечению определить оптимальную форму смазочного зазора проектируемого подшипника и соответствующую несущую способность подшипника.

Ключевые слова: осевой газовый подшипник, сухое трение, величина смазочного зазора, нагрузочная характеристика, коэффициент несущей способности, уравнение Рейнольдса, протяженность клиновидного участка, оптимальная форма смазочного зазора.

DECREASE IN DURATION OF THE MODE OF DRY FRICTION OF AXIAL GAS BEARINGS AT START-UP AND STOPS OF TURBOMACHINES**Olesya S. Portnova**

Senior lector of department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690950, Vladivostok, Suhanova Str., 8
e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Matvey V. Gribinichenko

Assistant professor, cand. Sci.Tech, head of department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690950, Vladivostok, Suhanova Str., 8
e-mail: korabel23@list.ru

Natalya V. Kytcenko

Senior lector of department of Ship Power Engineering and Automation
Far Eastern Federal University
690950, Vladivostok, Suhanova Str., 8
e-mail: tatka_i@list.ru

Andrey V. Nityagovskiy

Deputy director of the Far-Eastern branch – chief engineer
NIPTB "Onega"
692801, Bolshoy Kamen, Lebedeva Str., 1
e-mail: nitiagovsky@yandex.ru

Abstract

The paper considers the issues of reducing the duration of the axial gas bearing operation in the dry friction mode by partially replacing it with the gas lubricant mode. The analysis was carried out by comparing the load characteristics of axial gas bearings (the dependence of the bearing capacity on the size of the lubricating gap for various operating and structural parameters).

Load characteristics of axial bearings are obtained using a mathematical model and a program based on it. Axial bearings with profiling of working surfaces in the form of wedge-shaped sections are considered.

The obtained values of the maxima of the bearing capacity coefficient and the corresponding values of the optimal parameters allow the developer to determine the optimal shape of the lubricating gap of the designed bearing and the appropriate bearing capacity without resorting to special software.

Key words: axial gas bearing, dry friction, lubricant relief size, load characteristic, bearing capacity factor, Reynolds equation, wedge section extent, optimal shape of lubricant relief.

Введение

В статье рассмотрены вопросы снижения продолжительности работы подшипника в режиме сухого трения путем частичной замены его режимом газовой смазки. Производится анализ путем сравнения зависимостей несущей способности от величины смазочного зазора при различных режимных и конструктивных параметров. Отношение несущей способности от величины смазочного зазора называют нагрузочной характеристикой. В настоящей работе такие характеристики получены с помощью математической модели и написанной на ее основе программы.

1. Общее описание математической модели

В настоящей работе применена математическая модель течения газа в тонком слое переменной величины осевого газового подшипника с профилированием рабочих поверхностей в виде клиновидных участков [3,5].

В основе модели лежит уравнение Рейнольдса для газовой смазки, определяющее распределение давления P в смазочном слое [5].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rh^3 P \frac{\partial P}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (h^3 P \frac{\partial P}{\partial \theta}) = 6\mu\omega \frac{\partial(Ph)}{\partial \theta}$$

В уравнение вводятся геометрические параметры: P – давление газа в смазочном слое; r и θ – радиальная и угловая координаты, h – местная толщина смазочного слоя, μ – динамическая вязкость газа; ω – угловая скорость ротора относительно подпятника.

К уравнению вводятся граничные условия: давление на краях подшипника и (в случае расчета подшипника с наддувом) давления на кромках питателей.

2. Постановка задачи исследования

На основе представленной выше математической модели и написанной программы определяются характеристики подшипника, такие как несущая способность, момент трения и другие. Также с помощью данной программы можно решать оптимизационные задачи.

Например, в работах [1,4,5] с помощью этой модели исследовались зависимости интегральных характеристик различных типов подшипников с газовой смазкой от критериев подобия, которые были получены при составлении уравнений, входящих в модель.

В настоящей статье рассматриваются два критерия:

$$\chi = \frac{3\mu\omega R_2^2}{h_0^2 P_a}, \quad \bar{R}_l = R_1/R_2,$$

где R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиусы осевого подшипника, h_0 – значение смазочного зазора при котором произошло всплытие; P_a – давление на краях подшипника (давление окружающей среды).

Целью проводимых авторами исследований является снижение негативного влияния режима сухого трения при пусках и остановах машины. Достижение этой цели определяется решением двух задач: обеспечением как можно более раннего всплытия ротора и применением эффективных покрытий. В настоящей статье рассматривается первая из перечисленных задач.

Эта задача напрямую связана с повышением несущей способности смазочного слоя, которое достигается оптимизацией формы смазочного зазора.

3. Решение оптимизационной задачи

Проведенные ранее исследования осевых гибридных подшипников [1,2,4,5] показали, что параметрами, которые имеют оптимальные значения (далее – оптимальные параметры), являются:

значение протяженности клиновидного участка \bar{L}_{var} , относительная максимальная глубина клиновидного

участка $\bar{\delta}_0$, количество секторов Ψ . При этом исследователи отмечают, что значение оптимальных параметров значительно зависит от числа χ и отношения внутреннего радиуса подшипника к наружному \bar{R}_l . И если \bar{R}_l имеет постоянное значение для конкретного подшипника, то число χ изменяется, в основном, за счет частоты вращения ротора, которая входит в данное число.

Возникает вопрос - при каком значении χ (т.е. при каком режиме работы турбомшины) проводить оптимизацию подшипника. Чтобы ответить на него рассмотрим пример оценки процесса всплытия ротора в вертикальной турбомашине.

Не привязываясь к конкретной марке, рассмотрим машину, имеющую параметры схожую по характеристикам с существующими разработками турбин мощностью 30-50кВт. Примем номинальную частоту вращения ротора 50000 об/мин, массу ротора 5 кг. Размеры осевого подшипника

следующие: внутренний радиус $R_1=0,01\text{м}$. внешний радиус $R_2=0,05\text{м}$.

С помощью математической модели и составленной на ее основе программы построим зависимость несущей способности от частоты вращения ротора (рис.1). Выберем вариант нагрузки на подшипник, при котором осевая нагрузка формируется исключительно благодаря действию силы тяжести. В этом случае значение осевой нагрузки не зависит от динамики ротора, а зависимость будет представлять собой горизонтальную прямую линию (рис.1).

Рассмотрим два варианта оптимизации подшипника (подшипники №1 и №2). Подшипник №1 оптимизирован при частоте вращения 3000 об/мин, что для данного подшипника соответствует значению $\chi=11,85$. Подшипник №2 оптимизирован на номинальной частоте вращения турбомашин $n=50000$ об/мин, $\chi=197,54$.

Обратим внимание, что в целом при разгоне турбомашин несущая способность подшипника №2 оказывается выше, чем у подшипника №1, оптимизированного на частотах близких к пусковым. На основании этого можно сделать вывод, что оптимизация на номинальной частоте более целесообразна.

Но здесь следует учесть следующее обстоятельство.

Всплытие ротора произойдет в момент, когда формирующийся смазочный слой достигнет такой толщины h_0 при которой он не будет иметь разрывов и будет способен обеспечить бесконтактную работу узла трения в газодинамическом режиме. По оценкам исследователей [3] это значение равно примерно 6-7 микрометрам, а в расчетах настоящей работы принят 6,4 мкм.

Другими словами, всплытие ротора произойдет, когда несущая способность смазочного слоя толщиной h_0 будет равна нагрузке на подшипник.

Исходя из этой логики момент всплытия ротора на рис.1 будет определяться точкой пересечения линии нагрузки на подшипник и линии нагрузочной характеристики (точки А и В).

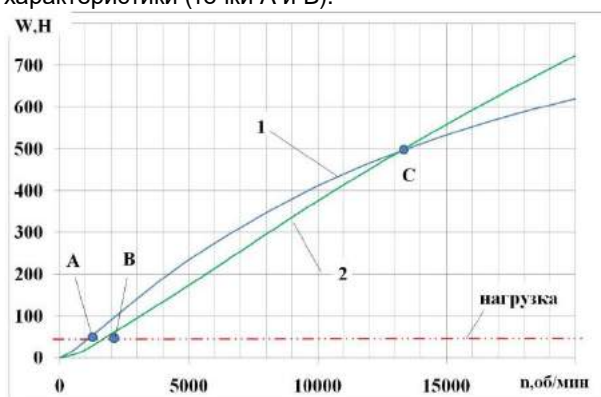


Рис.1 Нагрузочные характеристики подшипника оптимизированного при различных значениях параметра сжимаемости: 1- подшипник №1 ($\bar{\delta}_0=2,5$;

$\psi=3$; $\bar{L}_{var}=0,5$, оптимизация при $\chi=12,17$, $n=3000$ об/мин); 2- подшипник №2 ($\bar{\delta}_0=6,67$; $\psi=2$; $\bar{L}_{var}=0,275$, оптимизация при $\chi=202,79$, $n=50000$ об/мин)

Следует обратить внимание, что существует определенная область диаграммы (до частоты вращения приблизительно 13000 об/мин.) при которой несущая способность подшипника №1 выше, чем подшипника №2 (см. рис.1).

В итоге несмотря на то, что подшипник №1 в целом имеет несущую способность ниже, чем подшипник №2, в зоне малых частот вращения его несущая способность оказывается выше, что приводит к более раннему всплытию ротора (точка А находится левее точки В).

Можно сделать вывод, что подшипники для которых оптимизация проведена при малых значениях параметра χ имеют более низкое значение частоты всплытия ротора по сравнению с подшипниками у которых оптимизация проведена при значениях χ соответствующих номинальному режиму работы.

Таким образом, задача снижения продолжительности сухого трения, поставленная в настоящей работе должна решаться путем оптимизации параметров на малых частотах вращения ротора т.е. при малых значениях параметра χ .

При проектировании подшипника для выбора значений оптимальных параметров в большинстве случаев необходимо проводить объемные расчеты, часто с использованием специального программного обеспечения. В настоящей работе предлагается метод, при котором не требуется прибегать к расчетам, а пользоваться некоторыми ранее полученными данными сведенными в таблицы или диаграммы. Эти данные представляют собой множество значений максимумов несущей способности и соответствующих этим максимумам оптимальных параметров при различных значениях \bar{R}_l и χ (рис.3-5).

Такой комплекс значений и является основным результатом проведенного в настоящей работе численного эксперимента.

При проектировании подшипника предлагается выбрать подходящее значение коэффициента несущей способности (рис.2) и соответствующие этому значению, оптимальные параметры подшипника.

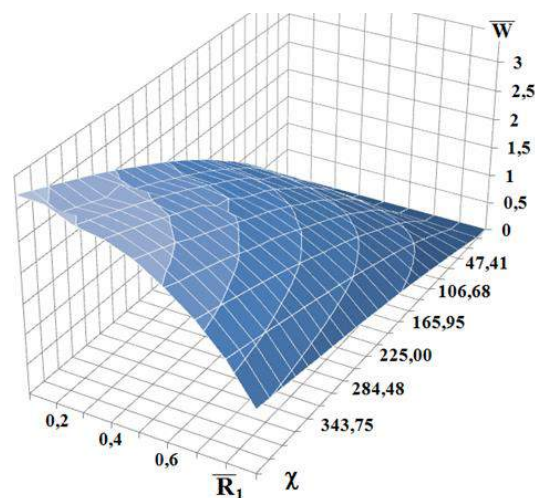


Рис.2 Максимумы коэффициента несущей способности

Анализируя зависимости оптимальных параметров от значений \bar{R}_l и χ можно обратить внимание на некоторые тенденции.

Рассмотрение поля значений оптимального количества секторов (рис.3) показывает, что сильное влияние на ψ^{opt} оказывает значение \bar{R}_l .

Что касается зависимости ψ^{opt} от χ то она имеет менее выраженный характер, особенно при малых значениях \bar{R}_l . Здесь наблюдается определенная тенденция к увеличению количества секторов при снижении χ , что надо учитывать, в случае если оптимизация подшипника проводится при малых значениях параметра χ т.е. для снижения продолжительности сухого трения и обеспечения как можно более раннего всплытия ротора.

Более сильной зависимость ψ^{opt} от χ становится при увеличении значения параметра \bar{R}_l . Например, если при значении $\bar{R}_l=0,1$ оптимальное значение количества секторов изменяется от 1 до 3, то при $\bar{R}_l=0,6$ уже от 3 до 9.

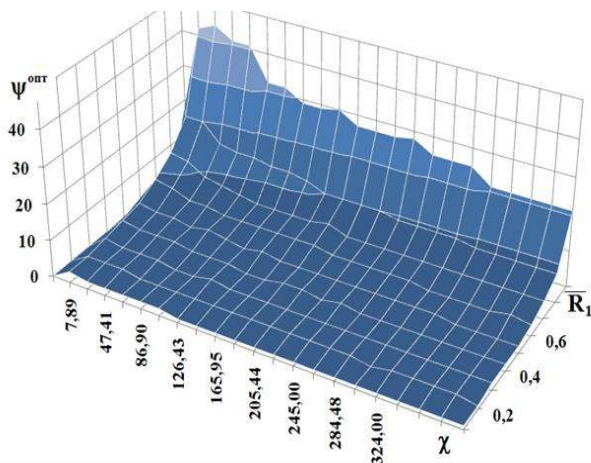


Рис.3 Оптимальные значения количества секторов

В случае с \bar{L}_{var}^{opt} (рис.4) можно указать, что здесь наибольшее влияние оказывает параметр χ . При наибольшем и наименьшем значениях χ из рассматриваемого диапазона, \bar{L}_{var}^{opt} изменяется на 0,1 во всем диапазоне изменения \bar{R}_l .

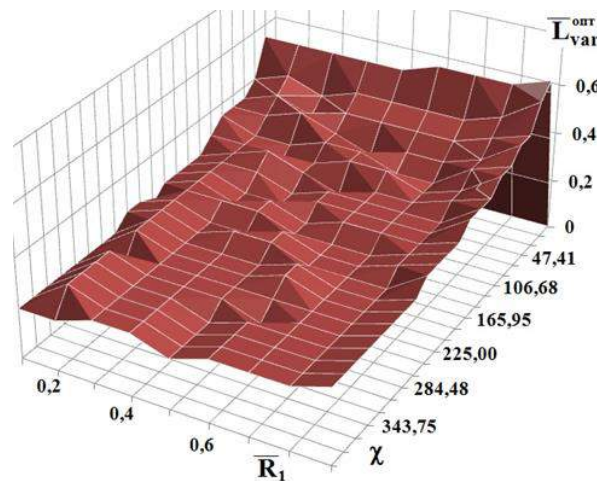


Рис.4 Оптимальные значения относительной протяженности клиновидного участка

При этом при изменении параметра χ от наименьшего до наибольшего значений для любого значения \bar{R}_l \bar{L}_{var}^{opt} изменяется на 0,4.

Поскольку для обеспечения раннего всплытия ротора, оптимизацию надо проводить при малых значениях χ , то здесь можно указать практически единственное оптимальное значение \bar{L}_{var}^{opt} лежащее в диапазоне 0,55 – 0,65.

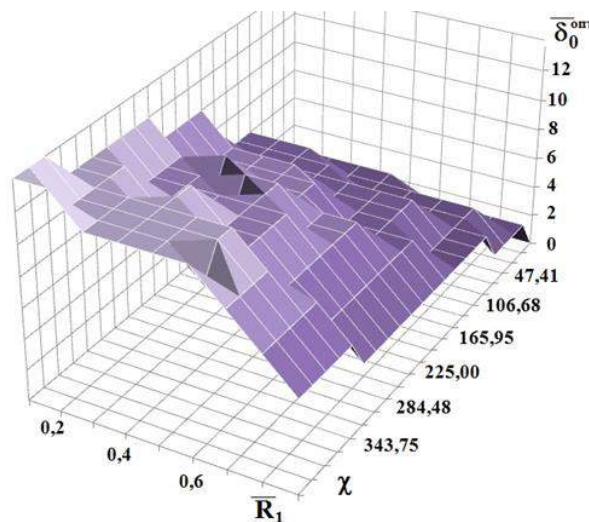


Рис.5 Оптимальные значения относительной глубины клиновидного участка

Поэтому с приемлемой для практики точности можно указать на значение \bar{L}_{var}^{opt} равным 0,6 для любых случаев. Отметим, что такой вывод упрощает задачу поскольку один из трех параметров, рассматриваемых в процессе решения оптимизационной задачи, выводится из нее с конкретным постоянным значением.

К аналогичному выводу можно прийти при рассмотрении множества значений $\bar{\delta}_0^{opt}$ (рис.5): при самых малых значениях χ значение $\bar{\delta}_0^{opt}$ практически одинаково для любого конструктивного варианта подшипника и равно 1,67.

Можно сделать вывод, что во многих практических случаях должно использоваться именно такое значение относительной глубины клиновидного участка.

Заключение

Проведенный численный эксперимент, позволяет сделать следующие выводы:

1. Подшипники, для которых оптимизация проведена при малых значениях параметра χ имеют более низкое значение частоты всплывания ротора по сравнению с подшипниками у которых оптимизация

проведена при значениях χ соответствующих номинальному режиму работы.

2. Полученные значения максимумов коэффициента несущей способности и соответствующих значений оптимальных параметров относительной протяженности клиновидного участка, относительной глубины клиновидного участка, количества секторов позволяют разработчику, не прибегая к специальному программному обеспечению определить оптимальную форму смазочного зазора проектируемого подшипника и соответствующую несущую способность подшипника.

3. С достаточной для решения практических задач точностью можно принимать оптимальные значения параметров $\bar{L}_{var}^{opt} = 0,6$, $\bar{\delta}_0^{opt} = 1,67$.

Литература

1. Грибиниченко, М.В. Осевые гибридные подшипники с газовой смазкой для турбокомпрессоров наддува судовых ДВС.: Дис... канд.техн.наук. Владивосток., ДВГТУ, 2006.– 146 с.
2. Грибиниченко, М.В. Численный эксперимент при исследовании свойств смазочного слоя осевых подшипников с газовой смазкой / М.В. Грибиниченко, А.В. Куренский, А.А. Самсонов, Ю.Я. Фершалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 12. – С. 18-20.
3. Константинеску, В. Н. Газовая смазка / В.Н. Константинеску. – М.: Машиностроение, 1968 –708с.
4. Куренский А.В., Повышение несущей способности осевых гибридных лепестковых подшипников с газовой смазкой судовых турбомашин.: Дис... канд.техн.наук. Владивосток., ДВГТУ, 2012.– 174 с.
5. Самсонов, А. И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин: учебное пособие / А.И. Самсонов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1996. – 112с.

References

1. Gribinichenko, M.V. Axial hybrid bearings with gas lubrication for turbochargers for supercharged ship internal combustion engines: Dis ... Candidate of Technical Sciences. Vladivostok., FESTU, 2006. 146 p.
2. Gribinichenko, M.V. Numerical experiment in the study of the properties of the lubricating layer of axial bearings with gas lubrication. M.V. Gribinichenko, A.V. Kurensky, A.A. Samsonov, Yu.Ya. Fershalov. Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2011. № 12. p. 18-20.
3. Constantinescu, V.N. Gas lubrication. V.N. Constantinescu. M.: Mashinostroenie, 1968. 708 p.
4. Kurensky A.V., Increasing the bearing capacity of axial hybrid petal bearings with gas lubrication of ship turbomachines: Dis ... Cand.Tech.Sci. Vladivostok., FESTU, 2012. 174 p.
5. Samsonov, A. I. Gas-lubricated bearings for turbomachines: study guide. A.I. Samsonov. Vladivostok: Publishing house FESTU, 1996. 112 p.

УДК 621.176.2, 621.186.85

БЕЗБОЙЛЕРНАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПАРОВОДЯНЫМИ СТРУЙНЫМИ СРЕДСТВАМИ ЦИРКУЛЯЦИИ

Анастасия Васильевна Аполлова

старший преподаватель кафедры энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Вячеслав Вячеславович Кожемякин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Владимир Олегович Кожемякин

ассистент кафедры энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com

Борис Александрович Тихомиров

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовых турбин и турбинных установок
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: b_tikhomirov@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена схема безбойлерной системы теплоснабжения для плавучей атомной теплоэлектростанции, в которой в качестве циркуляционного средства и средства подогрева сетевой воды используются пароводяные струйные аппараты (ПВСА). В ходе работы были изучены различные варианты подключения системы теплоснабжения ко второму контуру, в результате для дальнейших исследований была выбрана схема обогрева сетевого парогенератора паром из отбора от турбины высокого давления.

Для того чтобы сработать в турбине по возможности больший перепад давления необходимо поддерживать давление пара на входе в систему теплоснабжения в пределах 0,5-0,6 МПа. С этой целью было проведено исследование влияния количества ПВСА на характер зависимости давления пара перед ПВСА от температуры наружного воздуха. В ходе выполненных исследований было установлено, что именно 8 питательных и 8 сетевых ПВСА – наиболее целесообразное количество струйных аппаратов.

Было также выполнено исследование влияния характеристик ПВСА на характер зависимости давления пара перед ПВСА от температуры наружного воздуха. Были рассмотрены следующие параметры: длина первого конфузора, угол второго конфузора, диаметр парового сопла ПВСА. В результате выполненных исследований было установлено, что изменение вышеперечисленных параметров практически никак не влияет на зависимость давления пара перед ПВСА от температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: пароводяной струйный аппарат, сетевой контур, система теплоснабжения, коэффициентом инжекции, плавучая атомная теплоэлектростанция.

NON-BOILER HEAT SUPPLY SYSTEM WITH STEAM-WATER JET MEANS OF CIRCULATION

Anastasia V. Apollova

the senior lecturer of the department of energetics
State marine technical university of St.Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Vyacheslav V. Kozhemyakin

the associate professor, Dr.Sci.Tech.,
the head of the department of energetics
State marine technical university of St.Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Vladimir O. Kozhemyakin

the assistant of the department of energetics
State marine technical university of St.Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com

Boris A. Tikhomirov

Dr.Sci.Tech., the professor
The professor of the department of ship turbines and turbine installations
State marine technical university of St.Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: b_tikhomirov@mail.ru

Abstract

In this paper, a scheme of a without boiler heat supply system for a floating nuclear thermal power plant is studied. In the system steam-water jet devices (SWJD) are used as circulating means and means of heating network water. In the course of the work, various options for connecting the heat supply system to the second circuit were studied, and as a result, for further studies, the heating scheme of the mains steam generator by steam from the selection from a high-pressure turbine was chosen.

In order to operate in the turbine with the greatest possible pressure drop, it is necessary to maintain the vapor pressure at the inlet in the heat supply system within 0.5-0.6 MPa. To this end, the study of the effect of the amount of SWJD on the nature of the dependence of the vapor pressure in front of the SWJD on the outdoor temperature was conducted. In the course of the research it was found that exactly 8 nutrient and 8 network SWJD are the most appropriate number of jet devices.

A study of the influence of the SWJD characteristics on the nature of the dependence of the vapor pressure in front of the SWJD on the outdoor temperature was also carried out. The following parameters were considered: the length of the first confuser, the angle of the second confuser, the diameter of the steam nozzle. As a result of the research it was found that a change in the above parameters has virtually no effect on the dependence of the vapor pressure in front of the SWJD on the outdoor temperature.

Key words: steam-water jet device, network circuit, heating system, injection coefficient, floating nuclear power plant.

Введение

Идея заменить бойлер и сетевой электронасос в системе теплоснабжения пароводяным струйным аппаратом (ПВСА) появилась давно. Впервые ПВСА в централизованном теплоснабжении был применен, вероятно, в 1924 году в Ленинграде [1]. Циркуляция и подогрев воды в сетевом контуре осуществлялась классическим ПВСА со сверхкритическим паровым соплом. Результат был отрицательный, потому что такой ПВСА работает с очень маленьким коэффициентом инжекции, т.е. потребляет пара для обеспечения циркуляции в сети больше, чем необходимо для подогрева сетевой воды.

Кафедра Энергетики СПбГМТУ длительное время работает в области струйных технологий. При ее активном участии был создан ПВСА с дозвуковым паровым соплом, предназначенный для использования в качестве циркуляционного средства в первом контуре ядерных паропроизводящих установок. На стенде «Бета-К» на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ [2] была изучена работа такого ПВСА при низких давлениях. Эксперименты подтвердили возможность и целесообразность использования таких ПВСА в качестве циркуляционного средства и средства подогрева сетевой воды в сетевом контуре системы теплоснабжения, например, на плавучей атомной теплоэлектростанции [3].

Исследования выявили ряд особенностей работы ПВСА в системе теплоснабжения [4, 5]. Это позволило предложить схему безбойлерной системы теплоснабжения [6].

Были изучены параметры работы котельной СПбГМТУ [7], и на основании этих данных проведены расчетно-теоретические исследования этой системы [8]. Однако не был проанализирован вариант использования в ПВСА пара, отобранного в турбине.

1. Сетевой контур с ПВСА

Пар для сетевого контура можно генерировать в парогенераторе, обогреваемом теплоносителем второго контура. По такой схеме в ЯЭУ осуществляется генерация бытового пара. Это, вероятно, наиболее приемлемая схема системы теплоснабжения ПАТЭС. С одной стороны, это исключает попадание в сетевой контур радиоактивного теплоносителя первого контура при разгерметизации парогенератора. С другой стороны, это защищает второй контур – сетевой контур выполняется, как правило, из коррозионно-нестойких труб, работы (подключение новых объектов, ремонт и т.п.) выполняются на низком технологическом уровне.

Коллективом кафедры специально для плавучей атомной теплоэлектростанции была разработана система теплоснабжения (см. рис. 1), в которой циркуляция теплоносителя осуществляется без затрат электроэнергии. Эта схема предполагает использование прямоточного парогенератора с небольшим гидравлическим сопротивлением, обогреваемого вторым контуром.

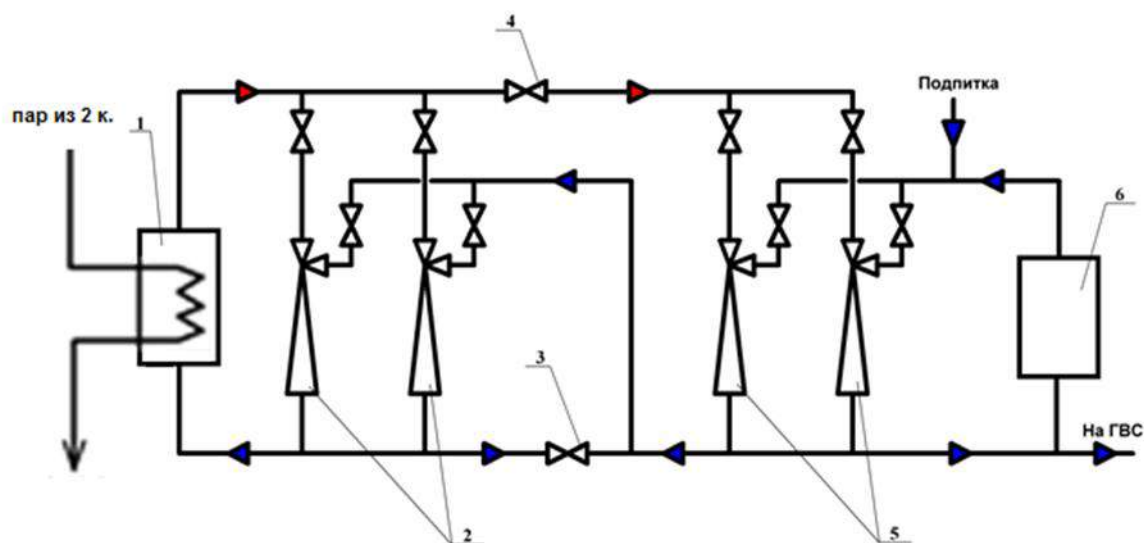


Рис. 1. Система теплоснабжения для плавучей атомной теплоэлектростанции:
 1 – парогенератор, 2 – питательные ПВСА, 3 – водяной регулирующий клапан, 4 – паровой регулирующий клапан, 5 – сетевые ПВСА, 6 – обогреваемые помещения

Обычно в котельных циркуляция теплоносителя в сетевом контуре обеспечивается электронасосами. Поэтому регулирование мощности, передаваемой потребителю, осуществляется за счет температуры теплоносителя при постоянном расходе. При низкой температуре наружного воздуха такое регулирование, с одной стороны, создает неудобства потребителю – температура радиаторов отопления оказывается высокой, с другой стороны, увеличиваются потери тепла из магистралей.

В сетевом контуре с ПВСА регулирование мощности, передаваемой потребителю, осуществляется не только за счет температуры теплоносителя, но и за счет расхода теплоносителя в сети.

Схема, представленная на рис. 1, позволяет регулировать мощность, передаваемую потребителю, в широком диапазоне. Грубое регулирование осуществляется изменением числа работающих питательных и сетевых ПВСА. Точное регулирование обеспечивается давлением пара перед соплами сетевых ПВСА.

2. Проведение исследований

В ходе выполнения работы были изучены различные варианты подключения системы теплоснабжения ко второму контуру. Обогрев системы теплоснабжения свежим паром второго контура является не рациональным. Поэтому напрашивается схема обогрева сетевого парогенератора паром из отбора от турбины электрогенератора или паром после турбопривода. Такая схема применяется на ТЭЦ, и это повышает эффективность использования топлива. Однако мощность системы теплоснабжения практически одинакова и днем, и ночью. А потребление электроэнергии ночью в несколько раз меньше, чем днем. На ТЭЦ, которые обычно работают в больших энергосистемах, эта проблема решается достаточно

просто – с помощью дополнительных турбогенераторов и котлов.

Вероятно, можно найти какое-то промежуточное решение – для обогрева сетевого парогенератора использовать какое-то количество пара из отбора турбины и свежий пар. Но это уже задача повышения эффективности паротурбинной установки, и она выходит за рамки данной работы.

Поскольку давление во втором контуре 3,6-4,5 МПа, а в системе теплоснабжения – 0,7-0,8 МПа, можно использовать в качестве греющей среды в парогенераторе пар второго контура от турбины высокого давления.

Для того чтобы сработать в турбине по возможности больший перепад давления и, таким образом, достичь высокой эффективности использования энергии, необходимо поддерживать давление пара на входе в систему теплоснабжения в пределах 0,5-0,6 МПа, так как при меньшем давлении работа ПВСА становится неустойчивой.

При понижении температуры наружного воздуха необходимо повышать давление пара перед паровым соплом струйного аппарата. Это увеличивает разность температур теплоносителя в прямой и обратной магистралях, а также расход теплоносителя в сети. Как следствие, повышается мощность, передаваемая потребителю. При повышении температуры наружного воздуха следует снижать мощность, передаваемую потребителю.

Мощность регулируется суммарной площадью камер смешения и давлением пара перед ПВСА. При снижении мощности снижается давление пара. Каждый раз, когда давление пара перед ПВСА доходит до 0,5 МПа, принудительно отключается один ПВСА, при этом уменьшение суммарной площади камер смешения необходимо компенсировать подъемом давления.

Было проведено исследование влияния количества ПВСА на характер зависимости давления пара перед ПВСА p_n от температуры наружного

воздуха $t_{нв}$. Для иллюстрирования этого влияния был рассмотрен контур с 4 питательными и 4 сетевыми ПВСА и контур с 6 питательными и 6 сетевыми ПВСА (рис. 2).

В контуре с 4 питательными и 4 сетевыми ПВСА (рис. 2, синяя линия), при температуре $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ производится отключение первого ПВСА, при этом суммарная площадь камер смешения уменьшается на 25 %. Отключение второго ПВСА производится при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом суммарная площадь камер смешения уменьшается на 33 %. При температуре $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ отключается предпоследний ПВСА. При этом суммарная площадь камер смешения уменьшается на 50 %. Для того, чтобы компенсировать такое уменьшение суммарной площади камер смешения, давление необходимо увеличить до 0,84 МПа.

В контуре с 6 питательными и 6 сетевыми ПВСА (рис. 2, красная линия), при температуре $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ отключается первый ПВСА, при этом суммарная площадь камер смешения уменьшается на 17 %. Второй ПВСА отключается при температуре $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом суммарная площадь камер смешения уменьшается на 20 %. Третий ПВСА отключается при температуре $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ и суммарная площадь камер смешения уменьшается на 25 %. При температуре $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит отключение четвертого (не предпоследнего!) ПВСА, и суммарная площадь камер смешения уменьшается на 33 %. Давление пара при этом необходимо увеличить только до 0,64 МПа.

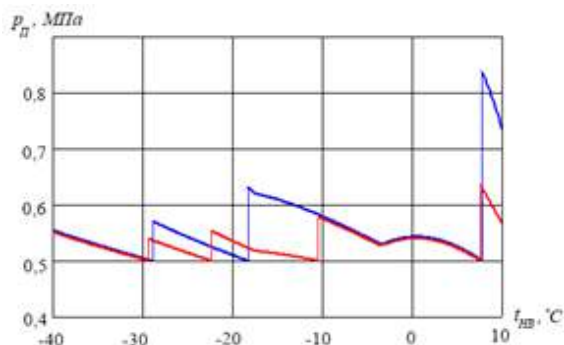


Рис. 2. Зависимость давления пара перед ПВСА $p_{п}$ от температуры наружного воздуха $t_{нв}$: синяя линия – 4 питательных и 4 сетевых ПВСА; красная линия – 6 питательных и 6 сетевых ПВСА

Таким образом, увеличение количества ПВСА позволяет снизить максимальное давление пара в системе теплоснабжения. С другой стороны, увеличение количества ПВСА приводит к усложнению регулирования струйными аппаратами.

В ходе выполненных исследований было установлено, что именно 8 питательных и 8 сетевых ПВСА – наиболее целесообразное количество струйных аппаратов, которые обеспечивают приемлемую зависимость и давление 0,6 МПа на выходе из турбины.

Было установлено, что при использовании в системе теплоснабжения 8 питательных и 8 сетевых параллельно включенных ПВСА, при температуре $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит отключение пятого ПВСА. При этом суммарная площадь камер смешения уменьшилась на 25 % и давление установилось равным 0,58 МПа.

График необходимого давления пара, обеспечивающего постоянную температуру в обогреваемом помещении, представлен на рис. 3.

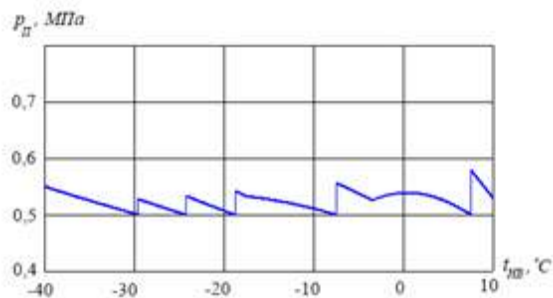


Рис. 3. Зависимость давления пара перед ПВСА $p_{п}$ от температуры наружного воздуха $t_{нв}$ при 8 питательных и 8 сетевых ПВСА

На рис. 4 показана зависимость расхода воды от температуры наружного воздуха. При понижении температуры наружного воздуха увеличивается расход теплоносителя в контуре, что в итоге приводит к повышению мощности, передаваемой потребителю.

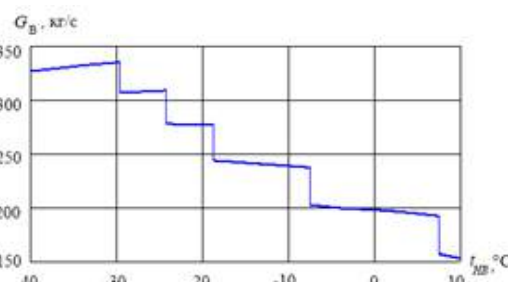


Рис. 4. Зависимость расхода воды от температуры наружного воздуха

На рис. 5 показана зависимость числа ПВСА от температуры наружного воздуха. Очевидно, что при понижении температуры наружного воздуха количество ПВСА должно увеличиваться.

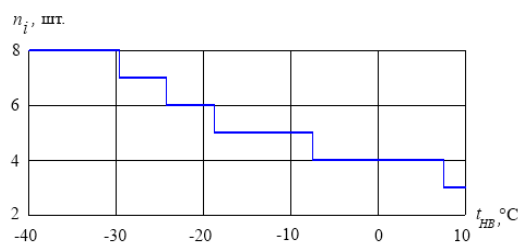


Рис. 5. Зависимость числа ПВСА от температуры наружного воздуха

Зависимость разности температур в прямой и обратной магистралях от температуры наружного воздуха представлена на рис. 6.

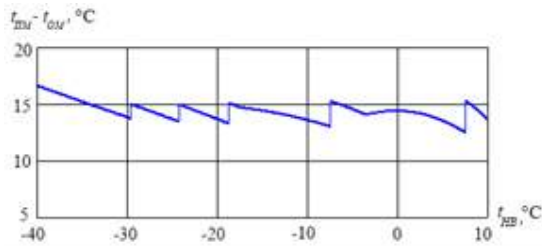


Рис. 6. Зависимость разности температур теплоносителя в прямой и обратной магистралях от температуры наружного воздуха

На рис. 7 при расходе на горячее водоснабжение $G_{ГВС} = 0$ кг/с (красная линия) и температуре $+8$ °C происходит отключение шестого ПВСА, суммарная площадь камер смешения уменьшается на 33 %. Давление пара при этом необходимо увеличить до 0,65 МПа.

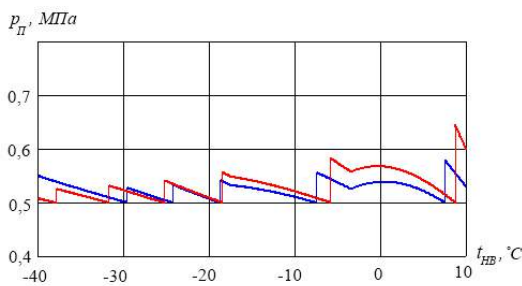


Рис. 7. Зависимость давления пара перед ПВСА от температуры наружного воздуха: при $G_{ГВС} = 20$ кг/с (синяя линия) и $G_{ГВС} = 0$ кг/с (красная линия)

На рис. 8 видно, что расход на горячее водоснабжение практически никак не влияет на температуры теплоносителя в прямой и обратной магистралях сетевого контура в зависимости от температуры наружного воздуха.

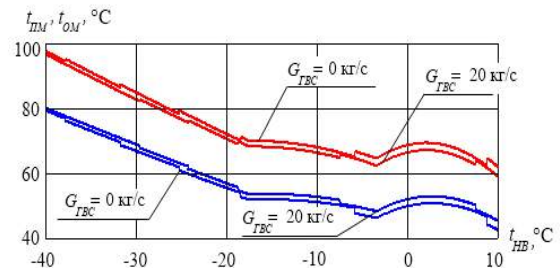


Рис. 8. Влияние расхода на горячее водоснабжение на зависимость температуры теплоносителя: в прямой (красная) и обратной (синяя) магистралях в сетевом контуре

Было также выполнено исследование влияния характеристик ПВСА на характер зависимости давления пара перед ПВСА $p_{п}$ от температуры наружного воздуха $t_{нв}$. Были рассмотрены следующие параметры: длина первого конфузора L_1 , угол второго конфузора β , диаметр парового сопла $d_{пс}$.

В результате выполненных исследований было установлено, что изменение вышеперечисленных параметров практически никак не влияет на зависимость давления пара перед ПВСА $p_{п}$ от температуры наружного воздуха $t_{нв}$.

Заключение

В ходе работы установлено, что наиболее перспективным вариантом подключения системы теплоснабжения ко второму контуру является схема обогрева сетевого парогенератора паром из отбора от турбины высокого давления.

В работе представлены зависимости различных параметров контура от температуры наружного воздуха.

Исследовано влияние количества ПВСА на характер зависимости давления пара перед ПВСА от температуры наружного воздуха. В ходе выполненных исследований установлено, что именно 8 питательных и 8 сетевых ПВСА – наиболее целесообразное количество струйных аппаратов.

Литература

1. Белевич А.И., Крупцев А.В., Малафеев В.А. О применении паровых инжекторов в теплоснабжении // Энергетик. 2001, № 11, с. 20-22.
2. Кожемякин В.В., Шаманов Н.П., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Алексеенко И.М. Полунатурный стенд для экспериментальных исследований судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета». Морской вестник. 2011, № 2, с. 47-48.
3. Кожемякин В.В., Шаманов Н.П., Лисицын Ф.С. Расчётно-теоретическое исследование пароводяных струйных аппаратов для систем теплоснабжения. Материалы Всероссийской межотраслевой НТК «Актуальные проблемы морской энергетики». СПбГМТУ, 2012, с. 299-301.
4. Кожемякин В.В. Согласование характеристик сети теплоснабжения и пароводяного струйного аппарата. Материалы региональной научно-технической конференции с международным участием «Кораблестроительное образование и наука - 2005», СПбГМТУ, 2005, том 2, с. 79-84.
5. Кожемякин В.В., Шаманов Н.П., Лоханов А.В. Расчётно-теоретическое исследование системы теплоснабжения для плавучей атомной теплоэлектростанции Материалы Всероссийской межотраслевой НТК «Актуальные проблемы морской энергетики». СПбГМТУ, 2012, с. 301-303.
6. Кожемякин В.В., Шаманов Н.П., Лоханов А.В. «Система тепловодоснабжения», патент RU 107330 F24D9/02, публ. 2011.08.10.
7. Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н. Особенности работы котельной СПбГМТУ. Материалы региональной научно-технической конференции с международным участием «Кораблестроительное образование и наука – 2005», СПбГМТУ, 2005, том 2, с. 73 – 78.

8. Кожемякин В.В., Лоханов А.В. Расчетно-теоретическое исследование безбойлерной системы теплоснабжения с пароводяными струйными средствами циркуляции // Морской вестник. 2011, №3, с. 49.

References

1. Belevich A.I., Krupcev A.V., Malafeev V.A. (2001). O primeneniiparovyhinzhektorov v teplosnabzheniiehsko, ehlektronnyjzhurnalenergoservisnojkompanii e kologicheskiesistemy. Energetik., 11, pp. 20-22.
2. V.V. Kozhemyakin, Shamanov N.P., Shamanov D.N., Solomyanskij V.B., Alekseenko I.M. (2011). Polunaturnyj stend dlya ehksperimental'nyh issledovanij sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata "Beta". Morskoj vestnik. 2. pp. 47-48.
3. Kozhemyakin V.V., Shamanov N.P., Lisicyn F.S. (2012). Raschyotno-teoreticheskoe issledovanie parovodyanyh strujnyh apparatov dlya sistem teplosnabzheniya. Materialy Vserossijskoj mezhotraslevoj NTK "Aktual'nye problemy morskoy ehnergetiki". SPbGMTU. pp. 299-301.
4. Kozhemyakin V.V. (2005), Soglasovanie harakteristik seti teplosnabzheniya i parovodyanogo strujnogo apparata. Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Korablestroitel'noe obrazovanie i nauka 2005", SPbGMTU. Tom 2, pp. 79-84.
5. Kozhemyakin V.V., Shamanov N.P., Lohanov A.V. (2012). Raschetno-teoreticheskoe issledovanie sistemy teplosnabzheniya dlya plavuchej atomnoj teploehlektrostantsii Materialy Vserossijskoj mezhotraslevoj NTK "Aktual'nye problemy morskoy ehnergetiki", SPbGMTU. pp. 301-303.
6. Kozhemyakin V.V., Shamanov N.P., Lohanov A.V. "Sistema teplovodosnabzheniya", patent RU 107330 F24D9/02, publ. 2011.08.10.
7. Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N. (2005). Osobennosti raboty kotel'noj SPbGMTU. Materialy regional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Korablestroitel'noe obrazovanie i nauka – 2005", SPbGMTU, tom 2, pp. 73 – 78.
8. Kozhemyakin V.V., Lohanov A.V. (2011). Raschetno-teoreticheskoe issledovanie bezbojlernoj sistemy teplosnabzheniya s parovodyanyymi strujnymi sredstvami cirkulyacii. Morskoj vestnik. 3. p. 49.

УДК 62-97/98, 62-714.9

ЕСТЕСТВЕННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОНТУРЕ С АРГОНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Вячеслав Вячеславович Кожемякин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Анастасия Васильевна Аполлова

старший преподаватель кафедры энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Владимир Олегович Кожемякин

инженер проблемной научно-технической лаборатории
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com

Роман Александрович Иванов

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
Крыловский государственный научный центр
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44
e-mail: R_Ivanov@rambler.ru

Аннотация

В настоящее время стало актуальным создание подводных добычных комплексов для удалённых арктических месторождений. Одним из способов снабжения энергией таких комплексов является применение автономного подводного ядерного энергетического модуля малой мощности. Преобразование тепловой энергии в электрическую, в таком модуле, может осуществляться в термоэлектрическом преобразователе, который обогревается вторым контуром. Для того чтобы обеспечить приемлемый коэффициент полезного действия термоэлектрического преобразователя, во втором контуре предусмотрена температура 311 °С. Для такого модуля была предложена система пассивного отвода тепла с промежуточным контуром, заполненным газом, с естественной циркуляцией.

Получены аналитические выражения, описывающие распределение температуры газа в опускном и подъёмном каналах, получены формулы для напора естественной циркуляции и гидравлического сопротивления контура.

Ряд допущений при расчете гидравлического сопротивления позволил получить аналитическую формулу для массового расхода газа при естественной циркуляции в промежуточном контуре. Отмечено, что в принятой математической модели расход газа не зависит от высоты канала.

В качестве примера рассмотрен контур, заполненный аргоном при давлении 10 МПа. Исследовано влияние степени подогрева газа на характеристики контура. Установлено, что при увеличении степени подогрева газа увеличивается мощность, передаваемая газом, и высота канала.

Ключевые слова: система пассивного отвода тепла, промежуточный газовый контур, напор естественной циркуляции, гидравлическое сопротивление, высота газового контура.

NATURAL CIRCULATION IN THE INTERMEDIATE CIRCUIT WITH ARGON HEAT CARRIER

Vyacheslav V. Kozhemyakin

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Anastasia V. Apollova

Senior Lecturer, Department of Power Engineering
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Vladimir O. Kozhemyakin

engineer of the problem-oriented scientific laboratory
St. Petersburg State Marine Technical University
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: kozhemiakinvlad@gmail.com
Roman A. Ivanov
 Dr.Sci.Tech, Professor, Chief Researcher
 "Krylov State Research Center"
 196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44
 e-mail: R_Ivanov@rambler.ru

Abstract

Currently, creation of underwater mining complexes for remote Arctic fields has become topical. One of the ways to supply energy to such complexes is the use of an autonomous underwater nuclear power module of low power. The conversion of thermal energy into electrical energy, in such a module, can be carried out in a thermoelectric converter, which is heated by a secondary circuit. In order to ensure acceptable efficiency of the thermoelectric converter, a temperature of 311 °C is provided in the secondary circuit. A passive heat removal system with an intermediate circuit filled with gas, with natural circulation was proposed for such a module.

Analytical expressions have been obtained describing the temperature distribution of the gas in the downtake and uptake channels, formulas were obtained for the head of natural circulation and the hydraulic resistance of the circuit.

A number of assumptions in the calculation of hydraulic resistance allow obtaining an analytical formula for the mass flow rate of gas during natural circulation in an intermediate circuit. It is noted that in the adopted mathematical model, gas consumption does not depend on the height of the channel.

As an example, a contour filled with argon at a pressure of 10 MPa, was reviewed. An influence of the degree of gas heating on the characteristics of the circuit was investigated. It has been established that with an increase in the degree of gas heating, the power transmitted by the gas and the height of the channel increase.

Keywords: passive heat removal system, intermediate gas circuit, natural circulation head, hydraulic resistance, height of the gas circuit.

Введение

В настоящее время стало актуальным создание подводных добычных комплексов на удалённых арктических месторождениях. Одним из способов снабжения энергией таких комплексов является применение автономного подводного ядерного энергетического модуля малой мощности. В представленном в статье [1] ядерном энергетическом модуле преобразование тепловой энергии в электрическую осуществляется в термоэлектрическом преобразователе, который обогревается вторым контуром. Для того чтобы обеспечить приемлемый коэффициент полезного действия термоэлектрического преобразователя, во втором контуре предусмотрена температура 311 °C.

1. Постановка задачи исследования

Такой ядерный энергетический модуль должен иметь систему пассивного отвода тепла (СПОТ). Разработке схемных решений, расчетным и экспериментальным исследованиям СПОТ, подключаемым к парогенератору со стороны второго контура, посвящено достаточно много публикаций, например [2-6].

Однако эти системы нельзя использовать при указанной в [1] температуре второго контура. Можно в СПОТ использовать регенеративный теплообменник, как предлагается в [7], или обеспечить высокое термическое сопротивление стенки забортного теплообменника. В любом случае это будет труднорегулируемое устройство.

Поэтому было предложено использовать в СПОТ промежуточный газовый контур (рис. 1).

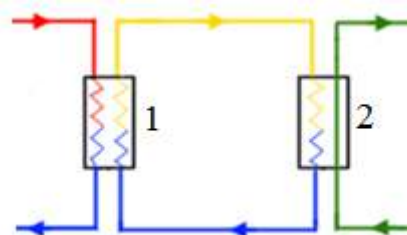


Рис. 1. Промежуточный контур с аргонem: 1 – теплообменник теплоноситель-аргон; 2 – теплообменник аргон-забортная вода

В промежуточном контуре необходимо обеспечить естественную циркуляцию газа (ЕЦ). Исследованию условий и параметров ЕЦ газа в промежуточном контуре посвящена данная работа.

2. Распределение температуры газа в промежуточном контуре

Пусть T_1 – температура охлаждаемого теплоносителя; T_2 – температура газа в подъемном канале; T_3 – температура газа в опускном канале; T_4 – температура забортной воды; T_{21} – температура газа в нижней точке контура; T_{22} – температура газа в верхней точке контура (рис. 2).

Если принять, что теплоемкость газа постоянная, то при статическом режиме распределение температур по высоте определяется уравнениями

$$T_2 = \tilde{T}_1 - (\tilde{T}_1 - T_{21})e^{-\lambda_2(1-u_1)y}, \tag{1}$$

$$T_3 = \tilde{T}_4 + (T_{21} - \tilde{T}_4)e^{\lambda_3(1-u_4)y}, \tag{2}$$

$$T_1 = T_{11} - u_1(T_{22} - T_2), \quad (3)$$

$$T_4 = T_{41} + u_4(T_3 - T_{21}), \quad (4)$$

где $\tilde{T}_1 = \frac{T_{11} - u_1 T_{22}}{1 - u_1}$; $\tilde{T}_4 = \frac{T_{41} - u_4 T_{21}}{1 - u_4}$; $u_1 = \frac{Gc_p}{G_1 c_{p1}}$;

$$u_4 = \frac{Gc_p}{G_4 c_{p4}}; \quad \lambda_2 = \frac{k_{12} P_{12} h_{\Sigma}}{Gc_p}; \quad \lambda_3 = \frac{k_{34} P_{34} h_{\Sigma}}{Gc_p};$$

$$y = \frac{h}{h_{\Sigma}}; \quad G, G_1, G_4 - \text{массовый расход соответственно}$$

газа, теплоносителя и забортной воды, кг/с; c_p, c_{p1}, c_{p4} – изобарная теплоемкость соответственно газа, теплоносителя и забортной воды, кДж/(кг·К); k_{12}, k_{34} – коэффициент теплопередачи от теплоносителя к газу и от газа к забортной воде соответственно, кВт/(м²·К); P_{12}, P_{34} – периметр соответственно греющей и охлаждаемой поверхности, м; h – текущая высота, м; h_{Σ} – высота газового контура, м.

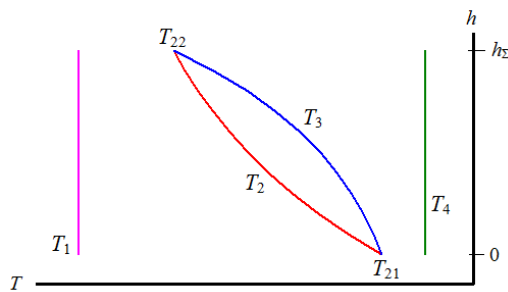


Рис. 2. Распределение температур по высоте газового контура

Соотношения расходов и теплоемкостей такие, что можно считать температуру теплоносителя T_1 и температуру забортной воды T_4 постоянными. Тогда уравнения (1), (2) упрощаются

$$T_2 = T_1 - (T_1 - T_{21})e^{-\lambda_2 y}, \quad (5)$$

$$T_3 = T_4 + (T_{21} - T_4)e^{\lambda_3 y}. \quad (6)$$

Подставив в уравнения (5), (6) граничное условие можно получить уравнения, определяющие минимальное и максимальное значения температуры газа

$$T_{21} = \frac{T_1(1 - e^{-\lambda_2}) - T_4(1 - e^{\lambda_3})}{e^{\lambda_3} - e^{-\lambda_2}}, \quad (7)$$

$$T_{22} = \frac{T_1(1 - e^{-\lambda_2})e^{\lambda_3} - T_4(1 - e^{\lambda_3})e^{-\lambda_2}}{e^{\lambda_3} - e^{-\lambda_2}}. \quad (8)$$

Целесообразно ввести параметр

$$\psi \equiv \frac{T_{22} - T_{21}}{T_1 - T_4}. \quad (9)$$

Из (3), (4) следует, что

$$\psi = \frac{(1 - e^{-\lambda_2})(e^{\lambda_3} - 1)}{e^{\lambda_3} - e^{-\lambda_2}}. \quad (10)$$

Влияние параметра ψ на распределение температуры газа в контуре при $\lambda_2 = \lambda_3$, $T_1 = 620$ К и $T_4 = 280$ К представлены на рис. 3.

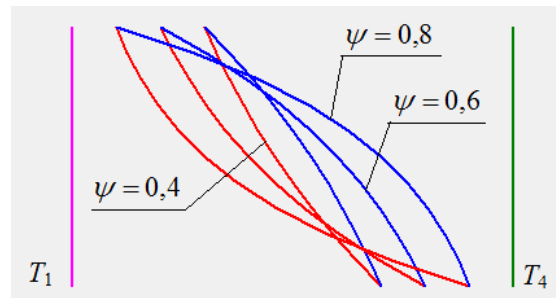


Рис. 3. Распределение температуры газа в контуре при $\lambda_2 = \lambda_3$

Как видно из рис. 3 увеличение параметра ψ приводит к увеличению разности температур между подъемным и опускным каналами. С одной стороны, это повышает напор ЕЦ, а с другой стороны, повышает и температуру стенки, охлаждаемой забортной водой.

Влияние отношения $\frac{\lambda_3}{\lambda_2}$ на распределение

температуры газа в контуре при $\psi = 0,6$, $T_1 = 620$ К и $T_4 = 280$ К представлены на рис. 4.

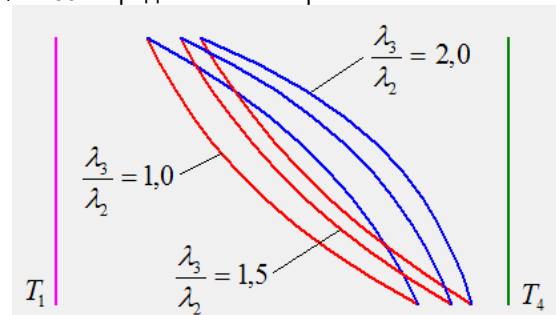


Рис. 4. Распределение температуры газа в контуре при $\psi = 0,6$

Как видно из рис. 4 увеличение отношения $\frac{\lambda_3}{\lambda_2}$

приводит к смещению диаграммы. Это практически не меняет напор ЕЦ, но позволяет изменять температуру стенки, охлаждаемой забортной водой.

Коэффициенты теплопередачи k_{12}, k_{34} будут определяться в основном теплоотдачей со стороны газа. Если k_{12} и k_{34} равны, то отношение $\frac{\lambda_3}{\lambda_2}$ равно

отношению $\frac{P_{34}}{P_{12}}$, то есть отношению периметров.

3. Напор естественной циркуляции газа в промежуточном контуре

Напор ЕЦ в таком контуре определяется уравнением

$$\Delta p_{\text{ЕЦ}} = g \int_0^{h_{\Sigma}} (\rho_3 - \rho_2) dh, \quad (11)$$

где ρ_2, ρ_3 – плотность газа соответственно в подъемном и опускном каналах, кг/м³.

Используя (5) и (6), можно получить уравнение для напора ЕЦ

$$\Delta p_{\text{ЕЦ}} = gh_{\Sigma} \left[\rho_4 - \rho_1 - \left(\frac{\rho_4}{\lambda_3} + \frac{\rho_1}{\lambda_2} \right) \ln \frac{T_{22}}{T_{21}} \right], \quad (12)$$

где $\rho_1 = \frac{p}{RT_1}, \rho_4 = \frac{p}{RT_4}$.

В качестве примера рассмотрен контур, заполненный аргоном при давлении 10 МПа. Результаты расчета зависимости напора ЕЦ от ψ

при $\frac{\lambda_3}{\lambda_2} = 3$ представлены на рис. 5.

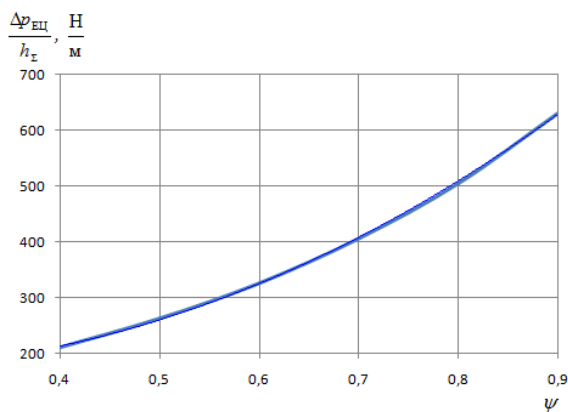


Рис. 5. Результаты расчета зависимости $\frac{\Delta p_{\text{ЕЦ}}}{h_{\Sigma}}$ от ψ при $\frac{\lambda_3}{\lambda_2} = 3$

Как видно из рисунка 5 зависимость напора ЕЦ от ψ является почти квадратичной параболой.

4. Гидравлическое сопротивление промежуточного контура

Гидравлическое сопротивление контура можно представить в виде суммы четырех слагаемых: гидравлического сопротивления трения подъемного канала, местного гидравлического сопротивления поворота в верхней части контура, гидравлического сопротивления трения опускного канала и местного гидравлического сопротивления поворота в нижней части контура.

Для гидравлического сопротивления контура было получено уравнение

$$\Delta p_{\text{ГС}} = \frac{G^2}{2f_2^2} \times \left[\frac{\xi_{\text{П}} h_{\Sigma}}{d_{\text{П}}} \left(v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2} \right) + \xi_{\text{МВ}} v_{22} \right] + \frac{G^2}{2f_3^2} \left[\frac{\xi_{\text{О}} h_{\Sigma}}{d_{\text{О}}} \left(v_4 + \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_3} \right) + \xi_{\text{МН}} v_{21} \right], \quad (13)$$

где f_2, f_3 – площадь проходного сечения соответственно подъемного и опускного участков; $d_{\text{П}}, d_{\text{О}}$ – гидравлический диаметр соответственно подъемного и опускного участков; $\xi_{\text{П}}, \xi_{\text{О}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления трения соответственно подъемного и опускного участков; $\xi_{\text{МВ}}, \xi_{\text{МН}}$ – коэффициент местного гидравлического сопротивления поворотов соответственно в верхней и нижней частях контура.

Таким образом, гидравлическое сопротивление контура зависит от достаточно большого количества конструктивных параметров. Вероятно, целесообразно потребовать, чтобы гидравлические сопротивления подъемного и опускного каналов были равны, то есть

$$\frac{1}{f_2^2} \left[\frac{\xi_{\text{П}} h_{\Sigma}}{d_{\text{П}}} \left(v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2} \right) + \xi_{\text{МВ}} v_{22} \right] = \frac{1}{f_3^2} \left[\frac{\xi_{\text{О}} h_{\Sigma}}{d_{\text{О}}} \left(v_4 + \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_3} \right) + \xi_{\text{МН}} v_{21} \right]. \quad (14)$$

Это накладывает дополнительное условие на площади. Для того чтобы получить наглядное выражение, можно пренебречь гидравлическим сопротивлением поворотов и вместо условия (14) использовать

$$\frac{1}{f_2^2} \left(v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2} \right) = \frac{1}{f_3^2} \left(v_4 + \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_3} \right). \quad (15)$$

Тогда уравнение (13) принимает вид

$$\Delta p_{\text{ГС}} = \frac{h_{\Sigma} G^2}{2f_2^2} \left(v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2} \right) \times \left[\frac{\xi_{\text{П}}}{d_{\text{П}}} + \frac{\xi_{\text{О}}}{d_{\text{О}}} \right]. \quad (16)$$

5. Массовый расход газа в промежуточном контуре

Если обозначить

$$A = g \left[\rho_4 - \rho_1 - \left(\frac{\rho_4}{\lambda_3} + \frac{\rho_1}{\lambda_2} \right) \ln \frac{T_{22}}{T_{21}} \right], \quad (17)$$

$$B = \frac{1}{2} \left(v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2} \right) \left[\frac{\xi_{II}}{d_{II}} + \frac{\xi_O}{d_{IO}} \right], \quad (18)$$

то уравнения (12) и (16) принимают соответственно вид

$$\Delta p_{ЕЦ} = h_{\Sigma} A, \quad (19)$$

$$\Delta p_{ГС} = h_{\Sigma} \frac{G^2}{f_2^2} B. \quad (20)$$

Поскольку напор ЕЦ в статическом режиме равен гидравлическому сопротивлению, из (19) и (20) следует

$$\frac{G}{f_2} = \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (21)$$

Это уравнение позволяет определить массовый расход газа, скорость и переносимую газом мощность

$$N = c_p (T_{22} - T_{21}) \cdot \quad (22)$$

Следует отметить, что в данной математической модели ни расход, ни переносимая газом мощность не зависят от высоты канала.

Было принято, что коэффициенты теплопередачи равны коэффициенту теплоотдачи со стороны газа. Это позволило определить высоту канала.

Результаты расчетов представлены в табл.1.

При увеличении относительного подогрева газа ψ , уменьшается массовый расход газа, увеличивается мощность, переносимая газом, и увеличивается высота канала.

Заключение

Для снижения температуры стенки забортного теплообменника СПОТ со стороны забортной воды предложен промежуточный газовый контур, в котором циркуляция газа осуществляется за счет напора ЕЦ.

Получены аналитические уравнения для распределения температуры газа в контуре, исследовано влияние степени относительного подогрева газа на характеристики контура.

На примере аргона показано, что при увеличении относительного подогрева газа, уменьшается массовый расход газа, увеличивается мощность, переносимая газом, и увеличивается высота канала.

Таблица 1

Результаты расчета контура с аргоном при $1_3/1_2= 3$

ψ	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$v_1 - \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_2}$, л/кг	7,870	8,128	8,462	8,892	9,450	10,223
$v_4 + \frac{v_{22} - v_{21}}{\lambda_3}$, л/кг	7,232	7,146	7,034	6,891	6,705	6,447
$\frac{f_3}{f_2}$	0,959	0,938	0,912	0,880	0,842	0,794
$\frac{\Delta p_{ГС}}{h_{\Sigma}} \cdot \frac{f_2^2}{G^2} 10^3$, м ² /кг	9,831	10,237	10,775	11,485	12,441	13,826
w_{21} , м/с	21,85	22,42	22,85	23,04	22,87	22,07
G , кг/с	2,09	2,11	2,07	1,96	1,76	1,46
N , кВт	170,5	215,3	253,9	280,4	287,9	267,5
h_{Σ} , м	3,697	4,639	5,578	6,527	7,531	8,793

Литература

1. Кожемякин В.В., Аполлова А.В., Кожемякин В.О., Зязин Д.М., Малыгин В.Е. Подводный ядерный энергетический модуль для подводного добычного комплекса. Материалы Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика из прошлого в будущее» СПбГМТУ, 2017, с. 291-295.
2. Хизбуллин А.М., Соколов А.Н., Пахомов А.Н., Большухин М.А. Система аварийного отвода тепла. Патент на ПМ № 150816.
3. Хизбуллин А.М., Пахомов А.Н., Соколов А.Н., Зверев Д.Л. Система аварийного расхолаживания. Патент на ПМ № 109898.
4. Соколов А.Н., Печенкин В.И., Полуничев В.И., Большухин М.А. Система аварийного отвода тепла. Патент на ПМ № 78600 от 27.11.2008.
5. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на приморской учебно-научной базе СПбГМТУ. Морские интеллектуальные технологии, 2018, № 4(42), т.1, с. 120-128.

6. Хизбуллин А.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н., Фадеев Ю.П., Соколов А.Н., Шмелев Д.И. Облик комплекса систем безопасности для перспективных судовых и транспортабельных реакторных установок. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. № 3. С. 61-68.
7. Кожемякин В.В., Киселев Н.В., Шаманов Н.П. Система расхолаживания двухконтурной ЯЭУ. Полезная модель. Патент RU 144595, 2014.

References

1. Kozhemyakin V.V., Apollova A.V., Kozhemyakin V.O., Zyazin D.M., Malygin V.E. Podvodnyy yadernyy energeticheskiy modul dlya podvodnogo dobychnogo kompleksa. Materialy Vserossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo foruma «Korabelnaya energetika iz proshlogo v budushcheye». SPbGMTU, 2017, pp. 291-295.
2. Khizbullin A.M., Sokolov A.N., Pakhomov A.N., Bolshukhin M.A. Sistema avariynogo otvoda tepla. Patent na PM 150816.
3. Khizbullin A.M., Pakhomov A.N., Sokolov A.N., Zverev D.L. Sistema avariynogo raskholazhivaniya. Patent na PM 109898.
4. Sokolov A.N., Pechenkin V.I., Polunichiev V.I., Bolshukhin M.A. Sistema avariynogo otvoda tepla. Patent na PM 78600 ot 27.11.2008.
5. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. (2018). Eksperimentalnyye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na primorskoy uchebno-nauchnoy baze SPbGMTU. Morskiye intellektualnyye tekhnologii, 4(42), t.1. pp. 120-128.
6. Khizbullin A.M., Bolshukhin M.A., Pakhomov A.N., Fadeyev Yu.P., Sokolov A.N., Shmelev D.I. (2016). Oblik kompleksa sistem bezopasnosti dlya perspektivnykh sudovykh i transportabelnykh reaktornykh ustanovok. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornyye konstanty, 3, pp. 61-68.
7. Kozhemyakin V.V., Kiselev N.V., Shamanov N.P. Sistema raskholazhivaniya dvukhkoturnoy YaEU. Poleznaya model. Patent RU 144595, 2014.

УДК 621.039.534...24

КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА

Анастасия Васильевна Аполлова

старший преподаватель кафедры энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Анастасия Олеговна Гайсина

студент группы 2301
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: ngaisina@bk.ru

Вячеслав Вячеславович Кожемякин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Аннотация

В работе предложена квазистатическая модель контура системы пассивного отвода тепла для расчета нестационарных процессов. В выбранной схеме пусковая емкость, пароводяной струйный аппарат, забортный теплообменник и парогенератор соединены последовательно, по аналогии с первым контуром моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета».

В ходе работы были выполнены расчетно-теоретические исследования квазистатических характеристик системы пассивного отвода тепла при переходе с одной мощности на другую, а также при аварийном расхолаживании с полной мощности.

В результате изучено влияние количества работающих пароводяных струйных аппаратов и забортных теплообменников на работу контура. Показано, что предложенная схема обеспечивает стабильную работу на стационарных режимах на мощности до 20% от номинальной. При уменьшении мощности до 0,1% от номинальной из-за высокого коэффициента инжекции и, соответственно, недостаточного напора, происходит срыв пароводяного струйного аппарата, и контур переходит на естественную циркуляцию.

Ключевые слова: квазистатические характеристики, система пассивного отвода тепла, пароводяной струйный аппарат, забортный теплообменник, парогенерирующий агрегат, парогенератор.

QUASI-STATIC CHARACTERISTICS OF THE PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM

Anastasia V. Apollova

Senior Lecturer, Department of Power Engineering
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

Anastasia O. Gaysina

student, group 2301
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: ngaisina@bk.ru

Vyacheslav V. Kozhemyakin

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering
St. Petersburg State Marine Technical University
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3
e-mail: kogh2012@yandex.ru

Abstract

In this paper, a quasi-static model of a circuit of a passive heat removal system for calculation of non-stationary processes is proposed. In the selected scheme, the starting receiver, the steam-water jet apparatus, the outboard heat exchanger and the steam generator are connected in series, by analogy with the first circuit of the monobloc steam generating unit "Beta".

In the course of the work, design and theoretical studies of quasi-static characteristics of the passive heat removal system during transition from one power to another, as well as during emergency cooldown from full power, were performed.

As a result, the effect of the number of operating steam-water jet devices and outboard heat exchangers on operation of the circuit has been studied. It is shown that the proposed scheme ensures

stable operation in stationary modes at power up to 20% of the nominal. When the power is reduced to 0.1% of the nominal, due to the high injection rate and, accordingly, insufficient pressure head, the steam-water jet apparatus is stalled, and the circuit switches to natural circulation.

Keywords: quasi-static characteristics, passive heat removal system, steam-water jet apparatus, outboard heat exchanger, steam generating unit, steam generator.

Введение

Система пассивного отвода тепла (СПОТ) должна передавать тепло от активной зоны ядерного паропроизводящего агрегата к конечным поглотителям (заборной воде или атмосферному воздуху) при штатном и аварийном расхолаживании, а также при работе на статических режимах малой мощности без участия паротурбинной установки [1], причем без использования дополнительных источников энергии. Это означает, что СПОТ должна преобразовывать часть отводимой тепловой энергии в работу по перемещению теплоносителя в самой СПОТ. Это можно осуществить с помощью естественной циркуляции (ЕЦ) или пароводяного струйного аппарата (ПВСА) [2].

Для использования ЕЦ охладитель должен быть расположен выше источника тепла, то есть конечным поглотителям может быть только атмосферный воздух.

Если циркуляция осуществляется ПВСА, то расположение охладителя в известных пределах безразлично. Однако в контуре с ПВСА возникает сложная обратная связь. При увеличении давления и недогрева теплоносителя на выходе из ПВСА до насыщения увеличивается расход ПВСА. В свою очередь, расход определяет недогрев до насыщения [3-5].

И если ПВСА может работать в достаточно широком диапазоне по давлению, то рабочий интервал по недогреву небольшой – 10-50 °С. При меньшем недогреве наступает, так называемый, срыв по горячей воде (напор ПВСА оказывается меньше гидравлического сопротивления контура), при большем – срыв по холодной воде (пар конденсируется в конфузоре).

Кроме того, для запуска ПВСА, т.е. для того, чтобы ПВСА начал создавать напор, необходимо через ПВСА обеспечить циркуляцию теплоносителя. Это можно сделать с помощью пусковой емкости или с помощью естественной циркуляции.

Целью данной работы является разработка схемы СПОТ, в которой на различных режимах, в том числе режимах расхолаживания, обеспечивались бы условия для работы ПВСА.

1. Квазистатические нестационарные процессы в СПОТ

Расхолаживание является нестационарным процессом. Однако создать полноценные нестационарные математические модели и программы ЭВМ для всевозможных схем в рамках данной работы не представляется возможным. Поэтому для расчета нестационарных процессов в СПОТ была предложена квазистатическая модель контура.

Предположим, что СПОТ работает на статическом режиме, и подводимая и отводимая мощности равны.

При повышении/снижении подводимой мощности в системе создается дисбаланс, который приведет к повышению/снижению давления и температуры в контуре.

В свою очередь, повышение/снижение температуры в контуре приведет к повышению/снижению температурного напора в заборном теплообменнике (ЗТО) и повышению/снижению отводимой мощности. Это приведет к восстановлению баланса мощности в контуре.

Учитывая небольшой объем СПОТ, дисбаланс будет незначительным, что позволяет говорить о квазистатическом состоянии контура.

Выполненные исследования позволили разработать схему СПОТ, в которой пусковая емкость, ПВСА, ЗТО и парогенератор соединены последовательно, как в первом контуре моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета».

Для этой схемы использована упрощенная математическая модель для расчетно-теоретических исследований статических и квазистатических (при расхолаживании) характеристик. Упрощения не касаются сути процессов, а, скорее, являются частным случаем:

- вся масса и энергия контура сосредоточены в емкости;
- вода в емкости находится на линии насыщения;
- объем емкости и суммарная масса воды-пара в ней постоянны;
- температура заборной воды равна 0 °С.

2. Квазистатические характеристики СПОТ при снижении подводимой мощности

В качестве примера представлены квазистатические характеристики (КСХ) системы пассивного отвода тепла при снижении подводимой мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту при работе 4 ПВСА и 4 ЗТО. Процесс выхода на мощность парогенератора длится 300 с. Весь процесс перехода с мощности 20% на 15% длится 450 с.

При уменьшении мощности парогенератора отводимая мощность в ЗТО становится больше подводимой, это приводит к снижению температуры в ЗТО (рис. 1).

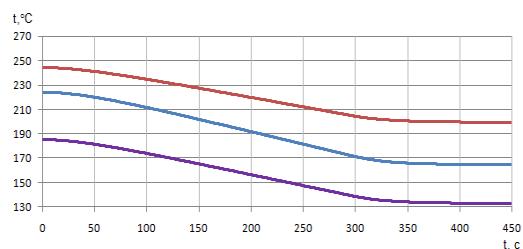


Рис. 1. Изменение температуры насыщения (красная линия), температуры смеси (синяя линия) и температуры воды на входе в ПВСА (фиолетовая

линия) при снижении мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту

Мощность, подводимая в парогенераторе и отводимая в ЗТО, различаются слабо (рис. 2). Отводимая мощность в ЗТО запаздывает, но почти линейна, поэтому можно считать эти режимы квазистатическими.

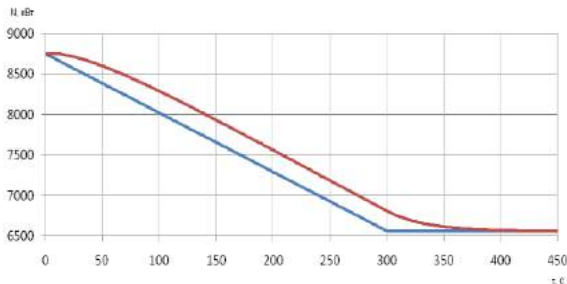


Рис. 2. Изменение мощности парогенератора (синяя линия) и ЗТО (красная линия) при снижении мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту

Из рисунка 2 видно, что температура смеси снижается быстрее температуры насыщения. Поэтому недогрев смеси до насыщения растёт. Снижение температур в СПОТ и уменьшение мощности, передаваемой забортной воде, приводит к снижению температуры забортной воды на выходе из забортного теплообменника.

Увеличение недогрева смеси до насыщения должно привести к увеличению расхода через ПВСА. Однако контур с ПВСА обладает саморегулированием, и, чтобы привести расход в соответствие с передаваемой мощностью в контуре снижается давление (рис. 3).

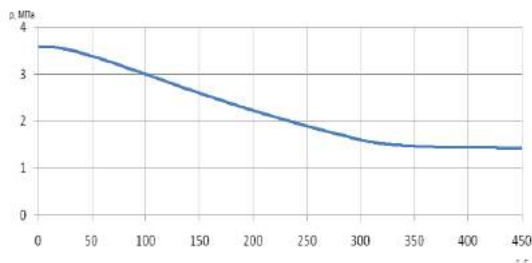


Рис. 3. Изменение давления в контуре при снижении мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту

Снижения температур и давления приводит к снижению расходов.

Расход пара на ПВСА из-за влияния нивелирных напоров снижается быстрее расхода воды на ПВСА, поэтому коэффициент инжекции растёт (рис. 4).

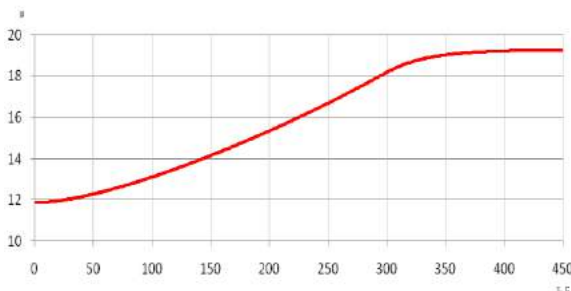


Рис. 4. Изменение коэффициента инжекции при снижении мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту

Расход пара на выходе из парогенератора снижается незначительно, поэтому при снижении мощности снижается массовое паросодержание на выходе из парогенератора (рис. 5).

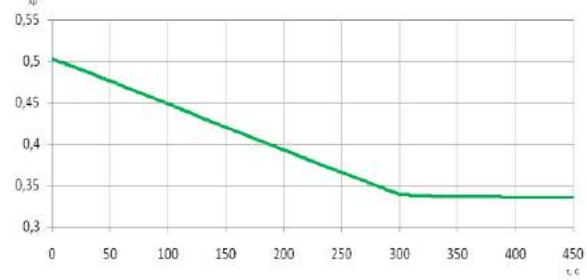


Рис. 5. Изменение массового паросодержания на выходе из парогенератора при снижении мощности с 20% до 15% со скоростью 1% в минуту

3. Влияние количества работающих ПВСА и ЗТО на квазистатические характеристики СПОТ

В СПОТ находятся несколько ПВСА и ЗТО, которые могут регулироваться арматурой. Было исследовано влияние отключения ПВСА и/или ЗТО на квазистатические характеристики. Процесс перехода с мощности 15% на 10% осуществлялся со скоростью 1% в минуту. Процесс выхода на мощность парогенератора занимает 300 с. Весь процесс перехода с мощности 15% на 10% длится 450 с.

Отключение ПВСА не влияет на мощность, отводимую в ЗТО (рис. 6). При отключении ЗТО увеличивается запаздывание мощности, отводимой в ЗТО, по сравнению с мощностью, подводимой в парогенератор.

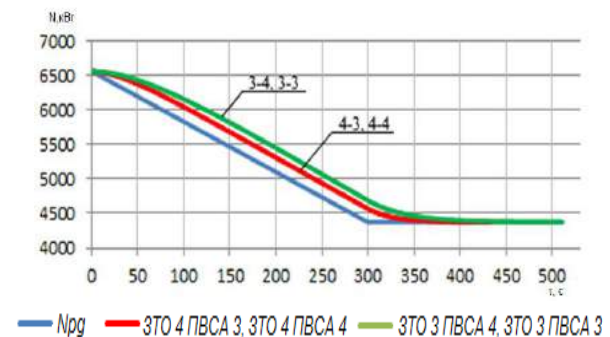


Рис. 6. Изменение мощности парогенератора и ЗТО при снижении мощности с 15% до 10% со скоростью 1% в минуту

Уменьшение количества работающих ЗТО приводит к значительному увеличению давления в контуре, а при уменьшении количества работающих ПВСА давление слабо увеличивается (рис. 7).

Процесс с 4 ЗТО и 3 ПВСА (красная линия на рисунке 7) обрывается через 300 секунд – это происходит из-за снижения температуры насыщения. Поэтому конденсация пара происходит в конфузорах, не доходя до цилиндрической части камер смешения, что и приводит к срыву ПВСА, который называется срывом по холодной воде.

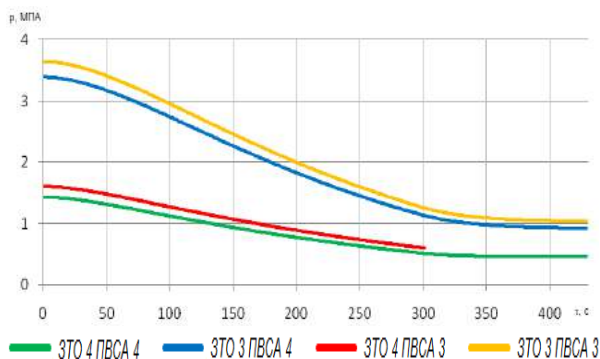


Рис. 7. Изменение давления в контуре при снижении мощности с 15% до 10% со скоростью 1% в минуту

Уменьшение количества работающих ЗТО приводит к значительному увеличению температуры воды на входе в ПВСА и температуры смеси на выходе из ПВСА, а при уменьшении количества работающих ПВСА температура воды и температура смеси слабо уменьшаются.

При уменьшении количества работающих ЗТО происходит значительное снижение недогрева смеси на выходе из ПВСА до температуры насыщения, а при уменьшении количества работающих ПВСА недогрев смеси на выходе из ПВСА увеличивается (рис. 8). Причем отключение одного ПВСА не компенсирует отключение одного ЗТО – при уменьшении количества работающих ПВСА и ЗТО недогрев смеси на выходе из ПВСА уменьшается.

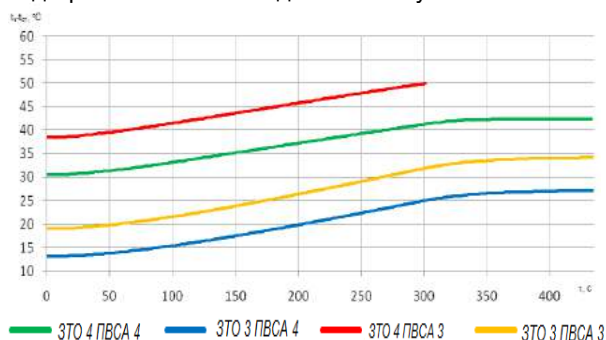


Рис. 8. Изменение недогрева смеси до насыщения при снижении мощности с 15% до 10% со скоростью 1% в минуту

Уменьшение количества работающих ЗТО и ПВСА приводит к уменьшению расхода воды на входе в ПВСА, причем влияние отключения ПВСА значительнее.

Уменьшение количества работающих ПВСА приводит к уменьшению расхода пара на входе в ПВСА, а уменьшение количества работающих ЗТО приводит к увеличению перепада давления на паровом сопле и, соответственно, существенному увеличению расхода пара на входе в ПВСА.

Значительное увеличение расхода пара на входе в ПВСА и снижение расхода воды при отключении ПВСА и/или ЗТО приводит к уменьшению коэффициента инжекции пароводяных струйных аппаратов (рис. 9).

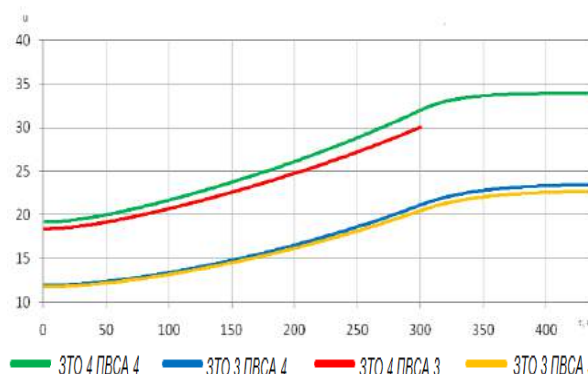


Рис. 9. Изменение коэффициента инжекции ПВСА при снижении мощности с 15% до 10% со скоростью 1% в минуту

Уменьшение количества работающих ПВСА приводит к уменьшению расхода пара на выходе из парогенератора и расхода через байпас, а уменьшение количества работающих ЗТО приводит к увеличению этих расходов.

Уменьшение количества работающих струйных аппаратов и/или заборных теплообменников приводит к увеличению массового паросодержания на выходе из парогенератора.

Масса воды и масса пара обеспечивают изменение давления в контуре в соответствии с рисунком 7.

Уменьшение количества работающих ЗТО приводит к увеличению температуры заборной воды на выходе из ЗТО.

Уменьшение количества работающих ПВСА не влияет температуру заборной воды на выходе из ЗТО.

4. Квазистатические характеристики СПОТ при аварийном расхолаживании

В рассматриваемой модели было принято, что мощность парогенератора меняется по закону:

$$N_{ПГ} = 0,065\tau^{-0.2},$$

где τ – время после подключения СПОТ, с.

Поскольку принято, что отвод 5% мощности обеспечивают 1 ПВСА и 1 ЗТО при аварийном расхолаживании с полной мощности, первое время контур должен быть включен и работать с небольшой перегрузкой.

4.1. Расхолаживание при работе 1 ПВСА из 4 и 1 ЗТО из 4

Исследования проводились для ЯППУ мощностью 175 МВт. Для такой установки предусмотрено 4 системы пассивного отвода тепла, и каждая СПОТ имеет 4 ПВСА и 4 ЗТО. Причем все ПВСА имеют одинаковые коэффициенты инжекции.

Было принято, что после срабатывания аварийной защиты мощность снижается до 6,5% от номинальной. В СПОТ подключен один ПВСА и один ЗТО. Результаты расчетов представлены на рисунках 10 – 12.

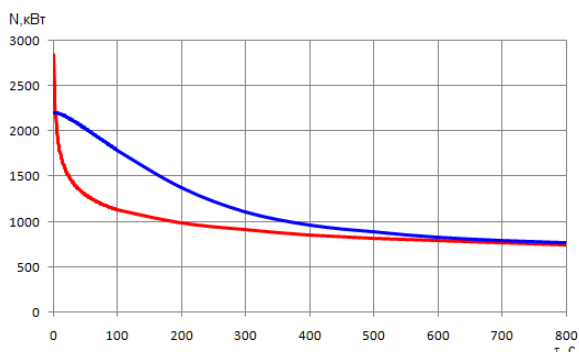


Рис. 10. Изменение мощности парогенератора (красная линия) и ЗТО (синяя линия) при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4 и 1 ЗТО из 4

При уменьшении мощности парогенератора отводимая мощность в ЗТО становится больше подводимой, поэтому температуры в контуре начинают снижаться.

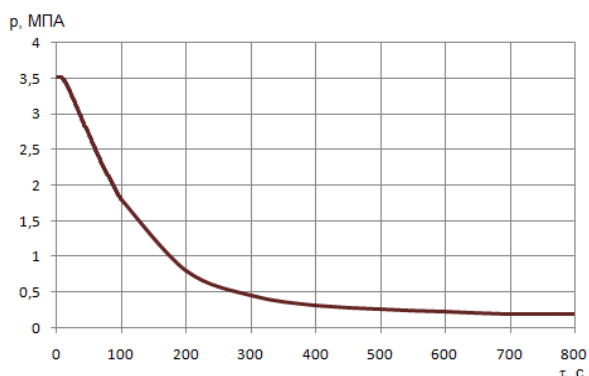


Рис. 11. Изменение давления в контуре при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 4

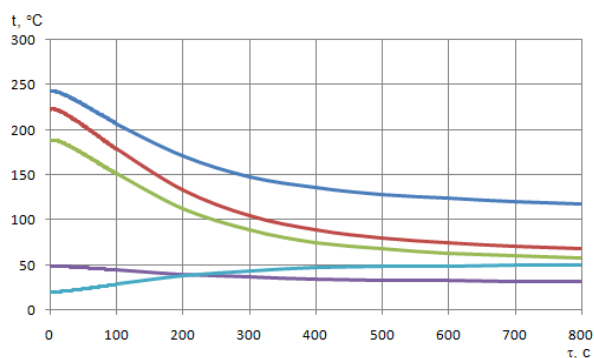


Рис. 12. Изменение температуры насыщения (синяя линия), температуры смеси (красная линия), температуры воды на входе в ПВСА (зеленая линия), температуры забортной воды на выходе из ЗТО (голубая линия) и недогрева смеси до насыщения (фиолетовая линия) при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 4

Температура смеси снижается быстрее температуры насыщения. Поэтому недогрев смеси до насыщения растет (рис. 12). Снижение температур в СПОТ и уменьшение мощности, передаваемой забортной воде, приводит к снижению температуры забортной воды на выходе из ЗТО и снижению давления в контуре.

Недогрев смеси до насыщения быстро растет и через 800 секунд наступает срыв по холодной воде.

В целом из представленных рисунков видно, что контур имеет избыточную поверхность теплообмена ЗТО. Через 800 секунд подводимая мощность составляет 1,7% от номинальной, а поверхность теплообмена ЗТО составляет 5% от номинальной – 4 ЗТО рассчитаны на мощность 20% от номинальной.

4.2. Расхолаживание при работе 1 ПВСА из 4 и 1 ЗТО из 8

В работе была рассмотрена схема установки, в которой каждая СПОТ имеет 4 одинаковых ПВСА и 8 одинаковых ЗТО.

Было принято, что после срабатывания аварийной защиты мощность снижается до мощности 6,5% от номинальной. В СПОТ подключен один ПВСА и один ЗТО, то есть установленная поверхность ЗТО уменьшена в 2 раза по сравнению с ЗТО, рассмотренным в пункте 4.1. Результаты расчеты представлены на рисунках 13-17.

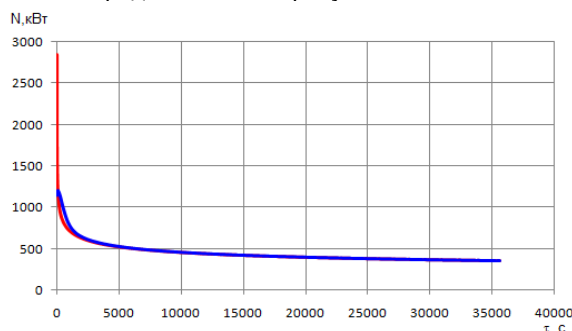


Рис. 13. Изменение мощности парогенератора (красная линия) и ЗТО (синяя линия) при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 8

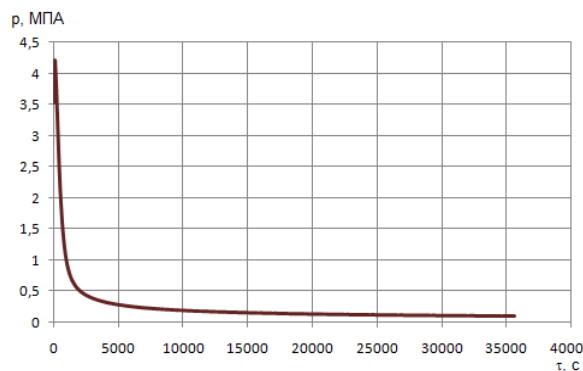


Рис. 14. Изменение давления в контуре при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 8

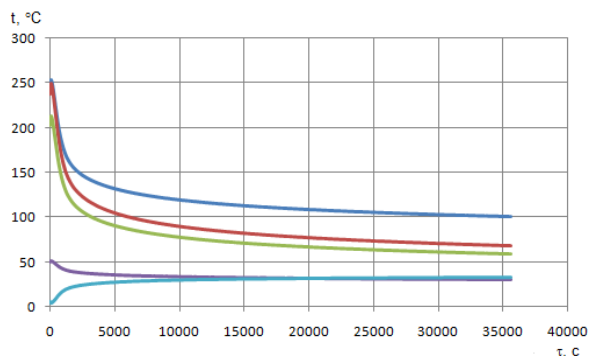


Рис. 15. Изменение температуры насыщения (синяя линия), температуры смеси (красная линия), температуры воды на входе в ПВСА (зеленая линия), температуры забортной воды на выходе из ЗТО (голубая линия) и недогрева смеси до насыщения (фиолетовая линия) при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 8

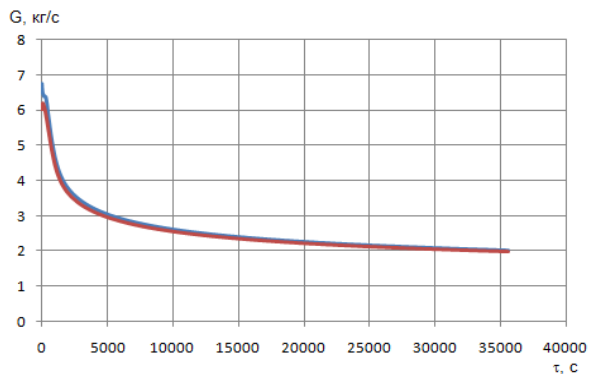


Рис. 16. Изменение расхода воды на ПВСА (красная линия) и расхода через парогенератор (синяя линия) при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 8

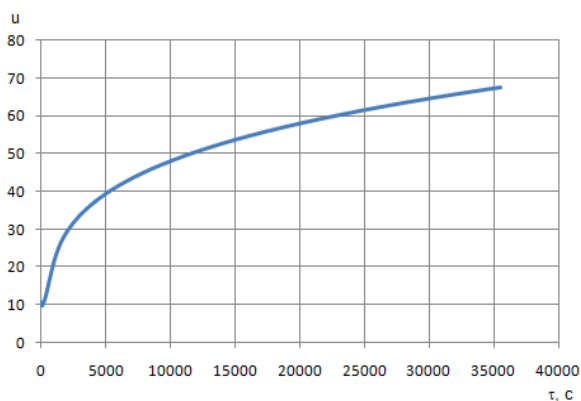


Рис. 17. Изменение коэффициента инжекции ПВСА при аварийном расхолаживании с полной мощностью. Подключены 1 ПВСА из 4, 1 ЗТО из 8

Из рисунков видно, что недогрев смеси до насыщения растет, но остается в рабочих пределах. Контур устойчиво работает.

Через 35600 секунд (~10 часов) из-за высокого коэффициента инжекции и, соответственно, недостаточного напора происходит срыв ПВСА. Далее контур переходит на естественную циркуляцию.

Заключение

На основании полученных в результате расчетов данных можно сделать следующие выводы о том, что предложенная схема обеспечивает:

- 1) работу на стационарных режимах до мощности 20% от номинальной;
- 2) переходы с одной мощности на другую;
- 3) аварийное расхолаживание в не пульсирующем режиме;
- 4) требуемые условия для работы ПВСА.

Литература

1. Хизбуллин А.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н., Фадеев Ю.П., Соколов А.Н., Шмелев Д.И. Облик комплекса систем безопасности для перспективных судовых и транспортабельных реакторных установок. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2016. № 3. С. 61-68.
2. Большухин М.А., Пахомов А.Н., Соколов А.Н., Хизбуллин А.М. Система аварийного отвода тепла. Патент РФ на полезную модель № 150816 от 27.02.2015.
3. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Ревков М.В., Дюкарев А.В. Парогенерирующий агрегат «Бета» // Морской вестник. - 2007. - Спец. выпуск № 1. - С. 124-125.
4. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Алексеенко И.М., Шкляр Н.В. Ядерный моноблочный паропроизводящий агрегат с кипящей активной зоной, паровым компенсатором объема и струйными средствами циркуляции // Морской вестник. - 2010. - № 2. - С. 53-56.
5. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Коршунов А.И. Расчетно-теоретическое исследование работы пароводяных струйных аппаратов в паропроизводящем агрегате «Бета». Материалы Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики», СПбГМТУ, 2012. с. 297-299.

References

1. Hizbullin A.M., Bolshuhin M.A., Pahomov A.N., Fadeev Yu.P., Sokolov A.N., Shmelev D.I. (2016). Oblik kompleksa sistem bezopasnosti dlya perspektivnykh sudovykh i transportabelnykh reaktornykh ustanovok. Voprosy atomnoy nauki i tehnik. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty, 3, 61-68.
2. Bolshuhin M.A., Pahomov A.N., Sokolov A.N., Hizbullin A.M. Sistema avariynogo otvoda tepla. Patent RF na poleznuyu model №150816 ot 27.02.2015.
3. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Revkov M.V., Dyukarev A.V. (2007). Parogeneriruyuschiy agregat «Beta». Morskoy vestnik. Spets. Vyipusk, 1, 124-125.
4. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Alekseenko I.M., Shklyarov N.V. (2010). Yadernyy monoblochnyy paroproizvodyaschiy agregat s kipyashey aktivnoy zonoj, parovym kompensatorom ob'ema i struynyimi sredstvami tsirkulyatsii. Morskoy vestnik, 2, 53-56.

5. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Korshunov A.I. Materialy Vserossiyskoy mezhotraslevoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aktualnyie problemyi morskoy energetiki». "Raschetno-teoreticheskoe issledovanie raboty parovodyanyih struynyih apparatov v paroproizvodyaschem agregate «Beta»", SPbGMTU, 2012, 297-299.

УДК 629.12.001.2

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБЩЕЙ ПОДМОТОРНОЙ РАМЫ АМОРТИЗИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ 5AL25, НАХОДЯЩИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ СУДАХ

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

Аунг Мьо Тхант

аспирант
кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: tinkokotun999@gmail.com

Армен Минасович Минасян

кандидат технических наук
доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
198262, Санкт-Петербург, ул. Ленинский, 101
e-mail: mamsar@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена модернизации подмоторной рамы амортизированного дизель – генераторного агрегата ДГА- 500, находящегося в эксплуатации на рефрижераторных судах, с целью предотвращения вибрационных повреждений.

Рассмотрены задачи прогнозирования колебаний конструкции (задача о свободных колебаниях конструкции и задача о вынужденных колебаниях конструкции).

Описана математическая постановка модального и гармонического анализа в САЕ-системе (ANSYS): **модальный анализ предназначен** для определения частот и форм (мод) собственных колебаний конструкций; **гармонический анализ** (полный и сокращенный методы, метод суперпозиции мод) для решения уравнений движения в случае вынужденных установившихся колебательных процессов. При гармоническом расчете использован метод суперпозиции мод.

Приведены определения собственных частот и форм колебаний общей несущей подмоторной рамы агрегата:

- на основе модального и гармонического анализа в среде ANSYS Workbench с упрощенной геометрией агрегата.

- с жестким и упругим креплением к судовому фундаменту на основе модального и гармонического анализа в среде ANSYS Workbench с уточненной геометрией агрегата.

Рассмотрены вариантные и поэтапные изменения элементов несущей подмоторной рамы с учетом и без учета амортизации ДГА.

Оценка возможных резонансных явлений и их допустимости произведена сопоставлением частот и форм колебаний с частотами возбуждающих сил и моментов.

Новизна технического решения по модернизации несущей подмоторной рамы ДГА подтверждена патентом на полезную модель.

Ключевые слова: колебания, смещение, напряжение, собственные частоты, гармоники, формы колебаний.

MODERNIZATION OF THE GENERAL SUB-FRAME OF DAMPED DIESEL GENERATORS 5AL25 UNDER OPERATION ON REFRIGERATOR SHIPS

Minas A. Minasyan

Doctor of Technical Science, 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

Aung Myo Thant

Postgraduate 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: tinkokotun999@gmail.com

Armen M. Minasyan

Candidate of Technical Science

Docent of the Computing Facilities and Information Technology

Saint-Petersburg State Marine Technical University

Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation

e-mail: mamsar@mail.ru

Abstract

The article is devoted to modernization of an engine mount of the shock-absorbed diesel-generator set DGS-500, which is in operation on refrigerated ships, in order to prevent vibration damage.

Problems of forecasting oscillations of a structure have been reviewed (the problem of free oscillations of a structure and the problem of forced oscillations of a structure).

The mathematical formulation of a modal and harmonic analysis in the CAE system (ANSYS) has been described: **modal analysis is designed** to determine the frequencies and forms (modes) of natural oscillations of structures; **harmonic analysis** (full and shortened methods, mode superposition method) for solving equations of motion in case of forced steady-state oscillatory processes. In harmonic calculation, the method of mode superposition is used.

Determinations of natural frequencies and modes of oscillations of the common bearing engine mount of the set are given:

- based on modal and harmonic analysis in the ANSYS workbench environment with a simplified DGS geometry.

- with rigid and resilient fastening to the ship foundation based on modal and harmonic analysis in the ANSYS workbench environment with a specified DGS geometry.

Alternate and stepping changes in the elements of the common bearing engine mount are considered with and without depreciation of DGS.

Evaluation of potential resonance phenomena and their assumption is carried out by comparing the frequencies and modes of oscillations with the frequencies of excitation forces and moments.

Novelty of the technical solution for modernization of the bearing DGS engine mount is confirmed by a patent for a utility model.

Keywords: oscillations, displacement, stress, natural frequencies, harmonics, waveforms.

Введение

Квалификационная оценка вибрации на рефрижераторных судах проекта в 437/11 с неуравновешенными пятицилиндровыми двигателями после длительной (15 лет) эксплуатации показала, что вибрация дизель-генераторных установок типа «Sulzer» 5AL25 и их элементов превышает нормы морского регистра судоходства [7]. Особенно велико превышение вертикальной и траверсной вибрации газотурбонагнетателя, блока дизеля и лапы генератора. В ходе обследования девяти судов выявлен ряд негативных моментов [7], среди которых в том числе и трещины верхних полос 7, 8 подмоторных рам (ПР) в районе маховика (рис. 1). Исходя из экономической целесообразности, для решения проблемы снижения вибрации и предотвращения трещины в районе маховика на теплоходе может служить модернизация подмоторных рам амортизированных дизель-генераторов 5AL25/30 (рис. 1), находящихся в эксплуатации на рефрижераторных судах [7, 10].

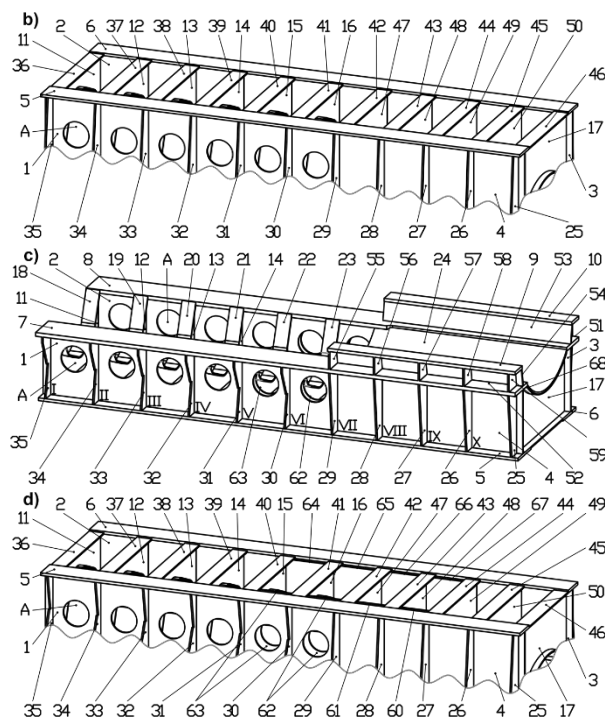
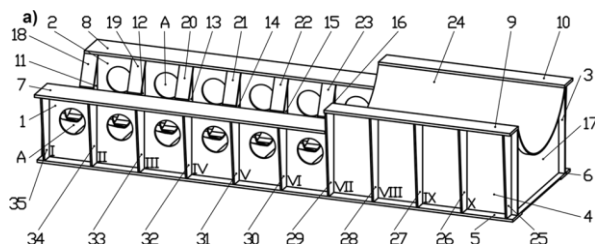


Рис. 1. Штатная и модифицированная подмоторная рама: 1-4 – продольные балки; 5-10 – опорные полосы; 11-16 – поперечные связи (бракетки) продольных балок 1, 2; 17 – торцевая поперечная связь продольных балок 3, 4; 18-23 – верхние полки поперечных связей продольных балок 1, 2; 24 – корытообразный лист; 25-35 – поперечные ребра жесткости; 36-46 – нижние полки поперечных связей балок 3, 4; 47-50 – промежуточные поперечные связи продольных балок 3, 4; А – отверстия, выполненные в продольных

балках 1, 2; I-X – наружные ячейки-секции (I-VI в районе дизеля, VII-X в районе генератора); 53, 54 – наклонные полосы; 55-59 – поперечные ребра жесткости между полосами 9 и 52, 10 и 51; 60-63, 64-67 – дополнительные продольные балки в пределах поперечных связей 15, 16, 47-49; 68 – верхние полки поперечных связей продольных балок 3, 4

1. Геометрическое моделирование

Известно, что если на начальной (концептуальные проработки изделия) стадии разработки допущена ошибка, то ее своевременное устранение на этой же стадии обойдется в 1 единицу дополнительных затрат. Устранение этой же ошибки, но на стадии опытно-конструкторских работ (ОКР), удорожается приблизительно в 10 раз, на стадии опытного производства – в 100 раз, на стадии серийного производства – в 1000 раз (при этом зачастую на стадии серийного производства вообще невозможны какие-либо исправления) [9].

Учитывая особенности указанных затрат, в конструкции модернизированной подmotorной рамы предусмотрены [10] (рис. 1в, 1г):

- дополнительные продольные балки в пределах поперечных связей (№ 60-67);
- наклонные полосы (№ 53, 54) и поперечные ребра жесткости между полосами 9 и 52 (№ 55-59);
- верхние полки поперечных связей продольных балок 3, 4 (№ 68).

Геометрическая модель модернизированной подmotorной рамы агрегата 5A25 создана в среде CAD-системы SOLIDWORKS [4] (рис. 2).

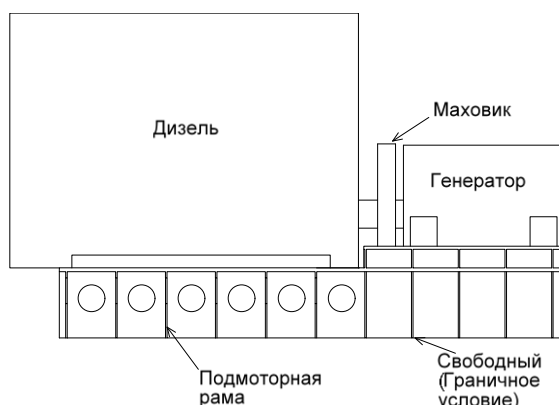


Рис. 2. Твердотельная модель агрегата ДГ 5A25 в среде CAD-системы (программный пакет SOLIDWORKS)

2. Определение собственных частот и форм колебаний общей несущей подmotorной рамы агрегата на основе модального анализа

Модernизированная подmotorная рама агрегата (рис. 1) в виде пространственной трехмерной твердотельной модели (3D модели) импортировалась в среду ANSYS Workbench (в CAE-модель).

В качестве материала агрегата приняли структурную сталь, имеющую модуль Юнга $2,0 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ [1, 8].

Для получения численного решения необходимо выполнить разбиение геометрических моделей конечно-элементной сеткой. При построении

сеточной модели необходимо искать оптимальную дискретность сетки, учитывать при этом задействованные ресурсы вычислительной системы (память, время и т.д.) и точность вычислений.

В работе использованы генерации регулярной сетки по разметке (Face Meshing) для поверхности верхней полки, нижней полки (рис. 1), стенки и ребер жесткости, что позволяет создать более однородную сетку и обеспечивает большую точность решения [4]. В этом случае сетка формируется четырехугольными (quadrilateral) или треугольными (triangular) элементами [4] (рис. 3).

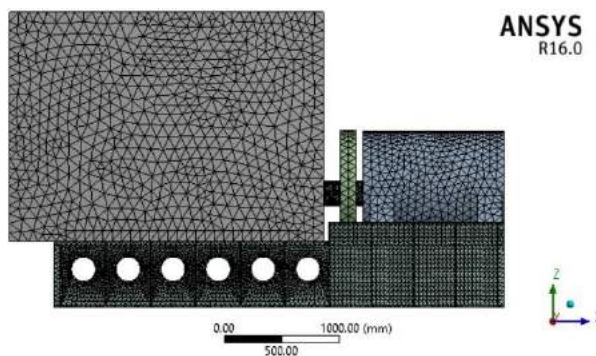


Рис. 3. Поверхности и сетка конечных элементов модели агрегата ДГ 5A25

В качестве граничного условия [1, 4, 9] выполним закрепление верхней полки ПР, соответствующее реальному способу его крепления к лапе дизеля и генератора.

Для модального анализа использован метод Ланцоша (Block Lanczos).

Количество определяемых частот колебаний задано равным 12.

Введем минимальную и максимальную частоты, определяющие частотный диапазон, в котором по предположению должны находиться искомые частоты, – 0 и 200 Гц соответственно [2].

Для определения вынужденных колебаний конструкции под действием периодической нагрузки, изменяющейся во времени по гармоническому (синусоидальному) закону применяется гармонический анализ [5].

Отдаленная нагрузка (для гармонического анализа) от центра тяжести дизеля и генератора к верхним полкам подmotorной рамы равна $121644 H$.

В качестве метода решения для гармонического анализа применен метод суперпозиции мод, использующий собственные частоты и формы колебаний для анализа установившихся вынужденных гармонических колебаний.

Соответствующие номера точек измерения деформаций и напряжений подmotorной рамы (на верхних и нижних полках по трём осям X, Y, Z, на стенках – по оси Y и на ребрах жесткости – по оси X) показаны на рис. 4.

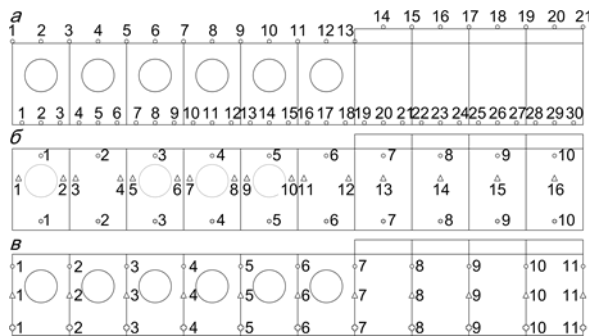


Рис. 4. Измерения деформации и напряжения в точках подмоторной рамы на: а – верхней и нижней полках; б – стенке; в – ребрах жесткости

3. Результаты и анализ

В статье показаны некоторые из 12 сформированных форм колебаний [5] (табл. 1).

Таблица 1

Частоты и соответствующие формы колебаний

№	Частоты [Гц]	Формы колебаний
1	0	Смещение жесткого тела
2	0	Смещение жесткого тела
3	$1,6 \cdot 10^{-4}$	Смещение жесткого тела
4	$3,4 \cdot 10^{-4}$	Смещение жесткого тела
5	$3,9 \cdot 10^{-4}$	Смещение жесткого тела
6	$5,0 \cdot 10^{-4}$	Смещение жесткого тела
7	73,32	Рис. 5
8	78,77	Рис. 6
9	83,48	Рис. 7
10	95,04	Рис. 8
11	108,99	Рис. 9
12	129,94	Рис. 10

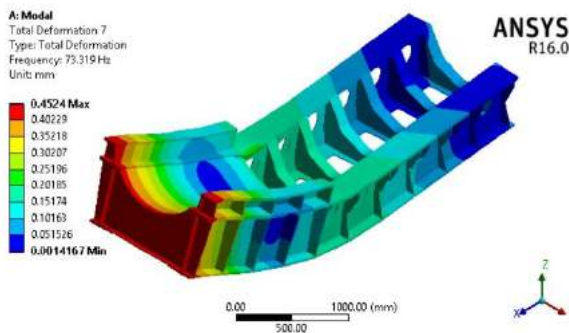


Рис. 5. Форма колебания 7 (табл. 1)

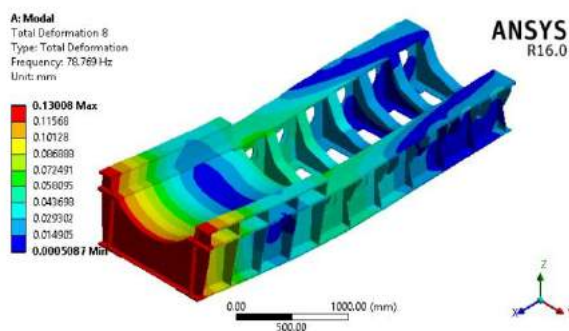


Рис. 6. Форма колебания 8 (табл. 1)

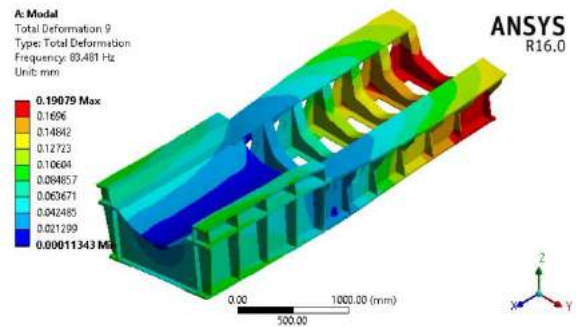


Рис. 7. Форма колебания 9 (табл. 1)

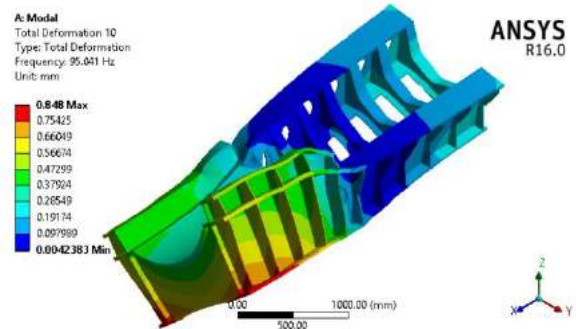


Рис. 8. Форма колебания 10 (табл. 1)

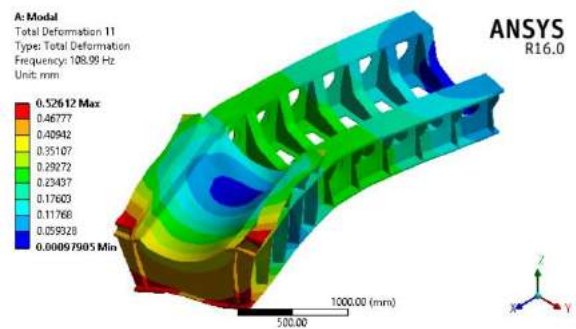


Рис. 9. Форма колебания 11 (табл. 1)

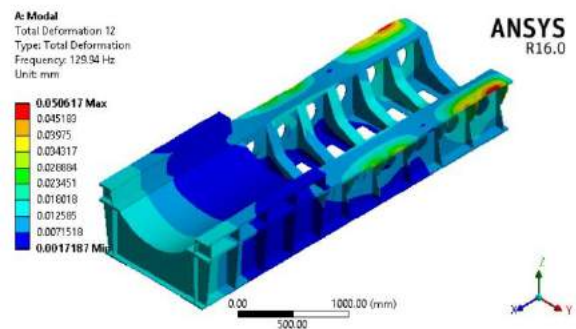


Рис. 10. Форма колебания 12 (табл. 1)

Сравнение полученных результатов гармонического анализа штатной (ШОНПР) и модернизированной общих несущих (МОНПР) подмоторных рам на частоте 12,5 Гц:

1. В диапазоне частот 0-125 Гц максимальная деформация МОНПР по осям Z и X, ниже (рис.

- 11), а по оси Y выше, чем у ШОНПР (рис. 11), (табл.2).
- Максимальное нормальное напряжение в верхней полке (точка № 13) МОНПР по осям X на 50% (рис. 12) и Y более 100 % (рис. 12) соответственно ниже, а по Z выше на 25 %, чем у ШОНПР (рис. 12), (табл.2).
 - Напряжения МОНПР по осям координат X, Y ниже, чем у ШОНПР (рис. 12), а по оси Z выше на 10 МПа, но при частоте 73 Гц (у ШОНПР 69,5 Гц), (табл. 2).
 - Максимальная деформация МОНПР по оси Z (при 73 Гц) выше, чем у ШОНПР (при 69,5 и 78,5 Гц), (рис. 13, табл. 3).
 - Максимальные деформация и напряжения у МОНПР имеют место при частотах свободных колебаний выше 12,5 Гц (а у рамы частота свободных колебаний по 73,5 Гц).
 - Напряжения МОНПР по осям координат X, Y, Z ниже, чем у ШОНПР (рис. 14).

Таблица 2

Максимальные деформации и напряжения в средней части рамы (точка № 13)

Ось	Деформация, мкм (рис. 11)		Напряжение, МПа (рис. 12)	
	ШОНПР (69,5 Гц)	МОНПР (73,5 Гц)	ШОНПР (69,5 Гц)	МОНПР (73,5 Гц)
X	290	170	116,31	63,32
Y	10	30	113,32	0,54
Z	910	650	39,79	50,00

Таблица 3

Собственные частоты рамы по осям X, Y, Z с максимальными деформациями и напряжениями

Ось	Деформация, мкм (рис. 13)		Напряжение, МПа (рис. 14)	
	ШОНПР	МОНПР	ШОНПР	МОНПР
X	70 (69,5 Гц)	60 (73,5 Гц)	9,39 (69,5 Гц)	3,58 (73,5 Гц)
Y	2 (83,5 Гц)	1 (109 Гц)	0,24 (78,5 Гц)	0,08 (73,5 Гц)
Z	50 (69,5 Гц)	90 (73,5 Гц)	0,45 (78,5 Гц)	0,11 (73 Гц)

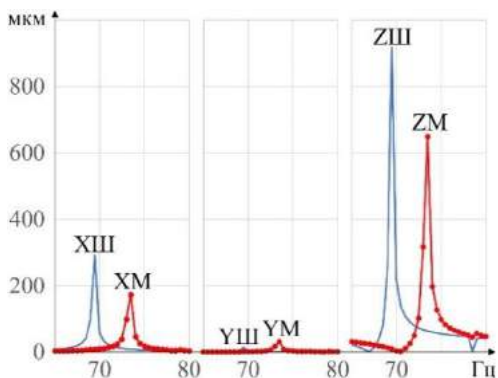


Рис. 11. Деформация в средней части верхней полки подmotorной рамы (точка 13)

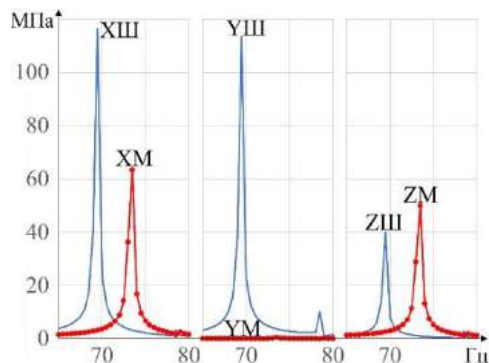


Рис. 12. Напряжение в средней части верхней полки подmotorной рамы (точка 13)

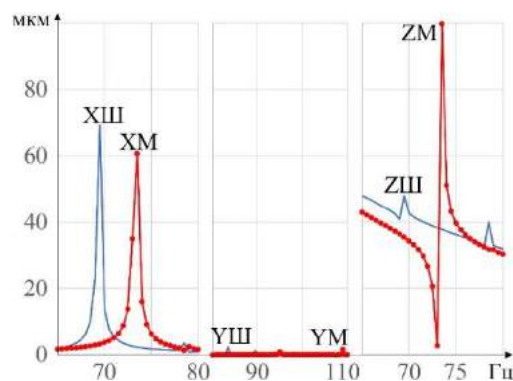


Рис. 13. Деформация подmotorной рамы

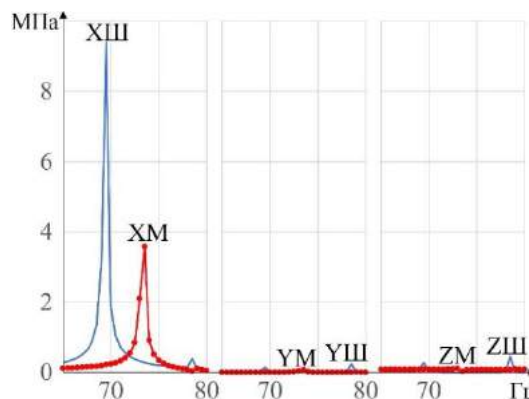


Рис. 14. Напряжения подmotorной рамы

Заключение

Выполнен модальный анализ штатной и модернизированной обших несущих подmotorных рам виброактивного судового дизель-генераторного агрегата 5AL25, в ходе которого определены частоты и формы их собственных колебаний. Модернизированная рама является более безопасной в процессе эксплуатации агрегата. Обоснованием этого являются также материалы, представленные в работе [7].

Оригинальность технического решения подтверждена патентом на полезную модель [7].

Литература

- Dr. Ramesha, C. V., Abhijith, K G., Abhinav Singh., Abhishek Raj., & Chetan S Naik. (2015). Modal Analysis and Harmonic Response Analysis of a Crankshaft. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 5(6), 323–327.

2. Pankaj, B. Aher., Sachin, K. Malave. (2017). Vibration Assessment of Diesel Engine Genset Mounts. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering, 5(6), 1700–1705.
3. URL: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_thry/thy_anproc4.html
4. Буряка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. Пособ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
5. Буряка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. Пособ. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.
6. Леонтьев Н. В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике», Нижний Новгород, 2006. 101 с.
7. Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Повышенная вибрация на рефрижераторных судах проекта В437/11 и технические предложения по её снижению // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 58–69.
8. Шевелев Н.А., Игнатъева Е.А., Пустосмехова М.Г. Численное моделирование динамического поведения экспериментальной оснастки в среде ANSYS // Вестник ПГТУ. Сер.: Механика. 2011. № 1. С. 81–96.
9. Яманин А.И., Голубев Ю.В., Жаров А.В., Шилов С.М., Павлов А. А. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2005. 480 с.
10. Рама амортизированного судового дизель-генератора: пат. на пол. модель № 181841 Рос. Федерация: МПК F16F 7/14, F16M 1/00 / авторы и заявители Минасян М.А., Минасян А.М., Аунг Мьо Тхант; патентообладатель ГОУ ВПО СПбГМТУ; опубли. 26.07.2018, Бюл. № 21.

References

1. Dr. Ramesha, C. V., Abhijith, K G., Abhinav Singh., Abhishek Raj., & Chetan S Naik. (2015). Modal Analysis and Harmonic Response Analysis of a Crankshaft. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 5(6), 323–327.
2. Pankaj, B. Aher., Sachin, K. Malave. (2017). Vibration Assessment of Diesel Engine Genset Mounts. International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering, 5(6), 1700–1705.
3. URL: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_thry/thy_anproc4.html
4. Buryaka V. A., Fokin V. G., Soldusova E. A., Glazunova N. A., Adeyanov I. E. Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench: Ucheb. Posob. – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2010. 271 s.
5. Buryaka V. A., Fokin V. G., Kuraeva Ya. V. Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench: Ucheb. Posob. – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2013. 149 s.
6. Leont'ev N. V. Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach modal'nogo i garmonicheskogo analiza: uchebno-metodicheskii material po programme povysheniya kvalifikatsii «Informatsionnye sistemy v matematike i mekhanike», Nizhniy Novgorod, 2006. 101 s.
7. Minasyan M. A., Aung M'o Tkhant, Minasyan A. M. Povyshennaya vibratsiya na refrizheratornykh sudakh proekta V437/11 i tekhnicheskie predlozheniya po ee snizheniyu // Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2018. № 3. S. 58–69.
8. Shevelev N. A., Ignat'eva E. A., Pustosmekhova M. G. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo povedeniya eksperimental'noy osnastki v srede ANSYS // Vestnik PGU. Ser.: Mekhanika. 2011. № 1. S. 81–96.
9. Yamanin A. I., Golubev Yu. V., Zharov A. V., Shilov S. M., Pavlov A. A. Komp'yuterno-informatsionnye tekhnologii v dvigatelestroenii: Uchebnoe posobie. – M.: Mashinostroenie, 2005. 480 s.
10. Rama amortizirovannogo sudovogo dizel'-generatora: pat. na pol. model' № 181841 Ros. Federacija: MПК F16F 7/14, F16M 1/00 / avtory i zajaviteli Minasjan M. A., Minasjan A. M., Aung M'o Thant; patentoobladatel' GOU VPO SPbGMTU; opubl. 26.07.2018, Bjul. № 21.

УДК 621.436-833:543.647

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ОБЩЕЙ НЕСУЩЕЙ РАМЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО СУДНА

Минасян Минас Арменакович

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

Минасян Армен Минасович

кандидат технических наук
доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
198262, Санкт-Петербург, пр. Ленинский, 101
e-mail: mamsar@mail.ru

Аунг Мьо Тхант

аспирант
кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: tinkokotun999@gmail.com

Киав Тхет Наинг

аспирант
кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: dstamarine14@gmail.com

Аннотация

Ранее в работах авторов были рассмотрены:

- вибрационные обследования на рефрижераторных судах проекта В437/11 и технические предложения по её снижению;
- вибрационная эффективность торообразных канатных виброизоляторов MAMSAR&A применительно системе амортизации дизеля 2Ч8,5/11 с гидротормозом, смонтированные на общей – несущей раме;
- применение торообразных канатных виброизоляторов MAMSAR&A в системе амортизации дизель – генераторного агрегата ДГА – 500 на двух судах.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований вибрации общей несущей рамы ДГА-500 с двигателем 5ЧН 25/30. Двигатель является неуравновешенным по моментам сил инерции вращающихся масс и поступательно движущихся масс первого и второго порядков.

По численным безразмерным критериям неуравновешенности поршневых двигателей внутреннего сгорания Каца А.М. двигатель 5ЧН 25/30 нельзя амортизировать низкочастотными виброизоляторами.

Подтверждена гипотеза о том, что причины образования трещин в районе маховика связаны с резонансными явлениями, возникающими во время работы дизель-генератора, в колебательных системах «агрегат – виброизоляторы» и «ротор генератора – маховик – коленчатый вал».

Для устранения повышенной вибрации и предотвращения трещин полок несущей общей рамы необходимо на основе расчета амортизации установить дизель-генераторный агрегат на новые опорные виброизоляторы, а также увеличить жесткость несущей рамы.

Ключевые слова: вибрация, дизель-генераторный агрегат, несущая рама, общая рама агрегата.

RESEARCH OF VIBRATION OF THE GENERAL SUPPORTING FRAME OF DIESEL-GENERATOR ASSEMBLY IN THE REAL CONDITIONS OF OPERATION OF THE REFRIGERATOR SHIP

Minas A. Minasyan

Doctor of Technical Science, Professor
Professor of the Department of Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines
Saint-Petersburg State Marine Technical University
Lotsmanskaya, 3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation
e-mail: mamsar@mail.ru

Armen M. Minasyan

PhD
Docent of the Department of Computing Facilities and Information Technology
Saint-Petersburg State Marine Technical University
Leninsky, 101, Saint-Petersburg, 198262, Russian Federation
e-mail: mamsar@mail.ru

Aung Myo Thant

Postgraduate 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: tinkokotun999@gmail.com

Kyaw Thet Naing

Postgraduate 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: dstamarine14@gmail.com

Abstract

Earlier, in the paper of the authors were considered:

- vibration surveys on refrigerated vessels of the project B437 / 11 and technical proposals for its reduction;
- vibration efficiency of toroidal rope isolators MAMSAR & A for the suspension system of diesel engine 2CH8,5/ 11 with hydraulic brakes that are mounted on a common - the supporting frame;
- the use of toroidal rope isolators MAMSAR & A in the suspension system of a diesel generator set DHA - 500 on two vessels.

In this paper, the experimental results of research of vibration of general supporting frame of DGA-500 with 5CHN 25/30 engine are presented. The engine is unbalanced by the moments of inertia force of the rotating masses and the progressively moving masses of the first and second orders.

According to the numerical dimensionless criteria of unbalance of reciprocating internal combustion engines Katz A.M. engine 5CHN 25/30 can't be suspended by low-frequency vibration isolators.

The hypothesis was confirmed that the causes of the frame of cracks in the flywheel region are related to resonant phenomena that occur during the operation of the diesel generator in the oscillation systems "unit-vibration insulators" and "generator rotor - flywheel-crankshaft".

To eliminate the increased vibration and prevent cracks in the shelves of the common supporting foundation, it is necessary, based on the calculation of shock-damper, to install the diesel generator unit on the new supporting vibration isolators, as well as to increase the rigidity of the supporting frame.

Key words: vibration, diesel generator unit, supporting frame, general frame unit.

Введение

Ранее в работах авторов [1], [2], [3] были рассмотрены:

- вибрационные обследования на рефрижераторных судах проекта В437/11 и технические предложения по снижению вибрации [1];
- вибрационная эффективность торообразных канатных виброизоляторов MAMSAR&A применительно системе амортизации дизеля 2СН8,5/11 с гидротормозом, смонтированных на общей-несущей раме [2];
- применение торообразных канатных виброизоляторов MAMSAR&A в системе

амортизации дизель-генераторного агрегата ДГА-500 на двух судах [3].

В настоящей работе рассматривается исследование вибрации общей несущей рамы ДГА-500 в реальных условиях эксплуатации.

1. Объект, цель и гипотеза исследования

Объектом исследования является общая несущая рама (рис. 1) дизель-генераторного агрегата ДГА-500 (№ 3), установленного в машинном отделении рефрижераторного судна "Федор Бредихин".

Гипотеза исследований – образование трещины в верхней полке несущей рамы в районе маховика связана с резонансными явлениями, возникающими

во время работы дизель-генератора, в колебательных системах «агрегат – виброизоляторы» и «ротор генератора – маховик – коленчатый вал» и с недостаточной жесткостью несущей рамы.

Целью исследования вибрационного состояния общей несущей подмоторной рамы являлся выяснение причин образования трещин в средней части верхней полки рамы в районе расположения маховика дизеля.

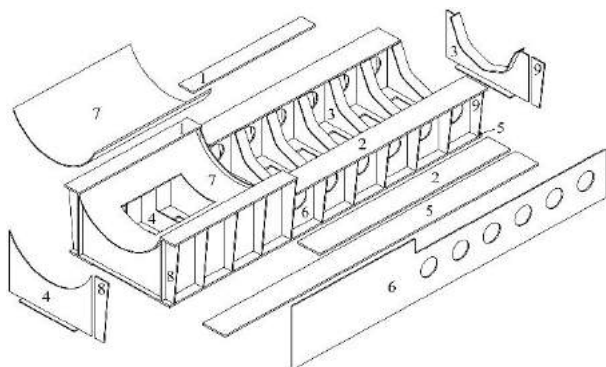


Рис. 1. Несущая подмоторная рама дизель-генераторного агрегата: 1, 2, 5 – опорные полосы (полки); 3, 4 – поперечные связи (бракеты) продольных балок; 6 – продольные балки; 7 – корытообразный лист; 8, 9 – поперечные ребра жесткости

2. Средства и результаты экспериментальных исследований

Измерения вибрации при исследованиях проводились вибропреобразователями и приборами, прошедшими поверку и имеющими отметку о её прохождении в паспорте.

Используемая измерительная аппаратура и приборы представлены на рис. 2.

Кроме представленных на рис. 2 измерительных средств, были использованы также самописец уровня т. 2317 и виброанализатор т. 3513 «Брюль Кьер».

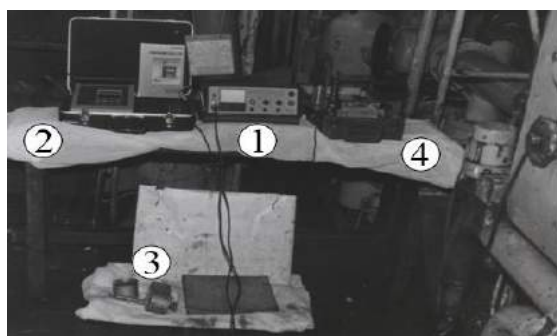


Рис. 2. Измерительные средства: 1 – Шумомер ВШВ-003; 2 – Виброметр 25 фирмы «SCHENK»; 3 – Тастограф т. «А»; 4 – механический индикатор.

При вибрационном обследовании подмоторной рамы были охвачены следующие элементы: 1, 2, 5 – опорные полосы (полки); 6 – продольные балки; 8, 9 – поперечные ребра жесткости (рис. 1) и опорные полосы (полки) судового фундамента (на рис. 1 не представлены). Точки замера вибрации несущей и фундаментной рам по отдельным ее элементам и соответствующие амплитуды вибро смещений по ним представлены на рисунке рис. 3. Отметим, что в материалах вибрационного обследования представлен широкий спектр рисунков не только по ДГА № 3, но и по ДГА № 1, 2, 4 данного судна. Вибрационное состояние в этих ДГА схоже с состоянием ДГА № 3.

В табл. 1 представлены значения модуля вертикального вибро смещения полок подмоторной рамы и судового фундамента.

3. Анализ результатов обследования

Из представленных рис. 3 и табл. 1 следует:

1. Амплитуды вибро смещений элементов общей несущей рамы для большинства точек превышают допустимое значение (160 мкм).

2. Наибольшая наблюдаемая амплитуда вибро перемещения на полках с носовой части генератора 270-600 мкм, кормовой части дизеля 140-160 мкм и средней части агрегата в районе маховика 40-170 мкм (рис. 3а, табл.1).

3. Значения амплитуд вибро смещений ребер жесткости (рис. 3е) составляют от 130 мкм до 180 мкм. Вибро смещения в нижних частях ребер (154-180 мкм) больше, чем в верхних частях (138-160 мкм), а в средней части 130-170 мкм.

4. Амплитуды поперечно-горизонтальных вибро смещений на продольной стенке подмоторной рамы составляет от 150 мкм до 300 мкм (рис. 3г). С носовой части рамы со стороны дизеля амплитуда 150 мкм (точка № 1, рис. 3г), однако по мере сближения к середине (точка № 3, рис. 3г) она увеличивается до 225 мкм и в районе маховика дизеля снижается до 160 мкм. Затем плавно увеличивается до 300 мкм по направлению к кормовой части рамы (точка № 7-10, рис. 3г).

5. Судовой фундамент обладает в целом достаточной жесткостью, за исключением района в носовой части дизеля, где амплитуда вибро смещения составляет 100 мкм (рис.3с, б)

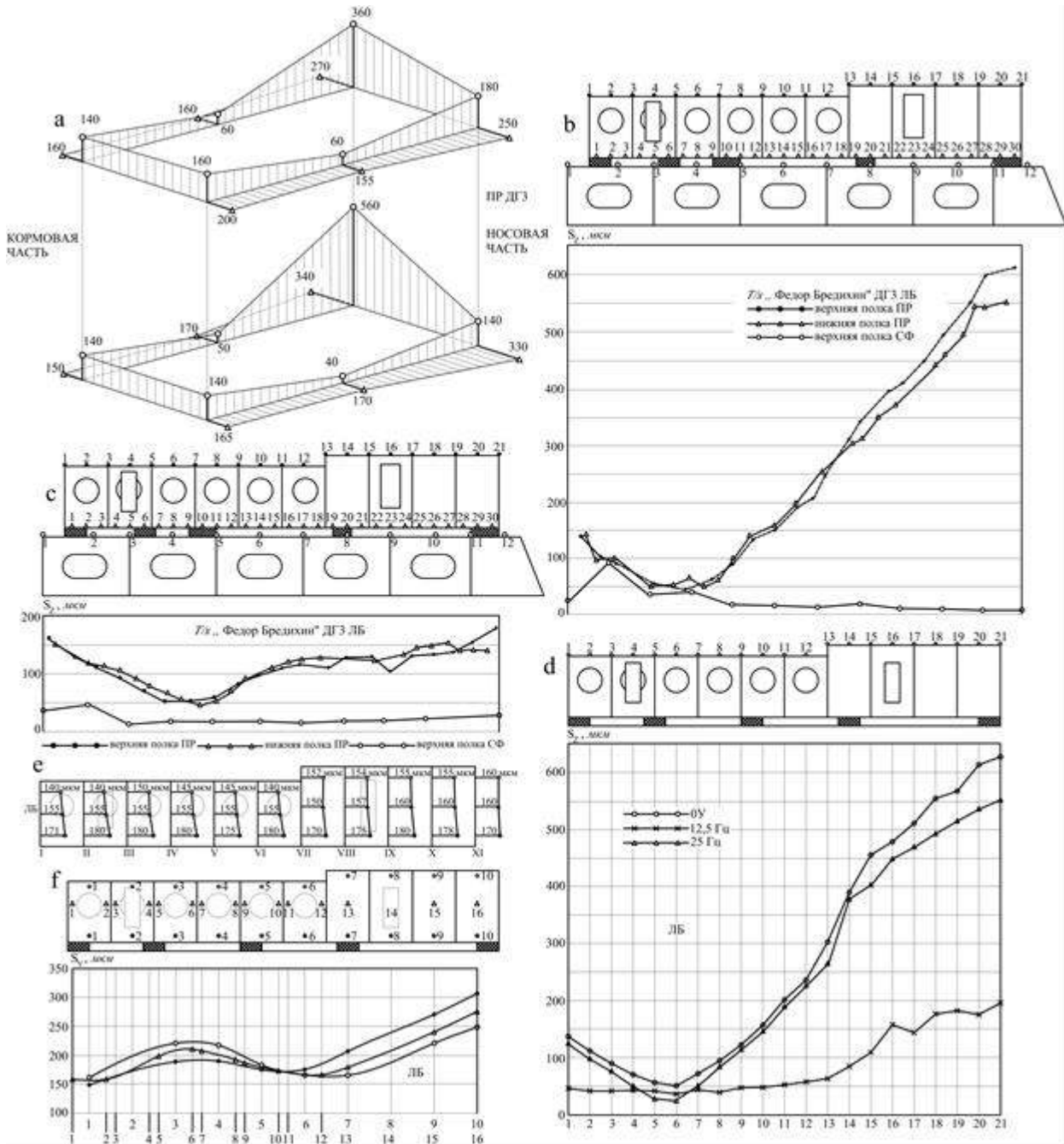


Рис. 3. Амплитуды вибросмещения основных элементов подмоторной рамы дизель-генераторного агрегата и полки судового фундамента: а – значения модулей вертикального и поперечно-горизонтального вибросмещений полок подмоторной рамы; б, с - значения модулей вертикального вибросмещения полок подмоторной рамы и судового фундамента; d - значения модулей вертикального вибросмещения верхней полки подмоторной рамы по общему уровню и при частотах 12,5 Гц и 25 Гц; е - значения модулей продольно-горизонтального вибросмещения ребер жесткости подмоторной рамы; г - значения модулей поперечно-горизонтальных вибросмещений на продольной стенке подмоторной рамы.

Таблица 1

Значения модуля вертикального вибросмещения полок подмоторной рамы и судового фундамента

Полки	Место замера	Борт	Вибросмещение, мкм
Нижние полки подмоторной рамы	Носовая часть	ЛБ	600
		ПБ	140
	Средняя часть	ЛБ	50
		ПБ	40
	Кормовая часть	ЛБ	140
		ПБ	140

Судового фундамента	Носовая часть	ЛБ	98
		ПБ	49
	Средняя часть	ЛБ	15
		ПБ	10
Кормовая часть	ЛБ	2	
	ПБ	30	
Перепад вибрации	Носовая часть	ЛБ	462
		ПБ	91
	Средняя часть	ЛБ	35
		ПБ	30
	Кормовая часть	ЛБ	138
		ПБ	110

4. Оценка допустимой неуравновешенности двигателя 5ЧН 25/30 по приближенным численным безразмерным критериям Каца А.М.

Численные безразмерные Критерии Каца А.М. по неуравновешенности поршневых двигателей предлагают учитывать совместное действие сил и моментов сил инерции [4, 5]:

$$\xi = \frac{1}{MD\omega^2} \left[P_I + 0,25P_{II} + \frac{6L(M_I + 0,25M_{II})}{L^2 + H^2} \right] \tag{1}$$

$$\eta = \frac{1}{MD\omega^2} \left[P_r + \frac{6LM_r}{L^2 + H^2} \right] \tag{2}$$

где D – диаметр поршня, м;
 M – масса Д, кг;
 L, H – длина и высота Д, м;
 ω – круговая частота вращения 1-го порядка;
 L_0 – расстояние между цилиндрами, м;
 R – радиус кривошипа, м;
 P_I, P_{II} и P_r – неуравновешенные силы инерции поступательно движущихся деталей 1-го, 2-го порядка и вращающихся масс;
 M_I, M_{II} и M_r – неуравновешенные моменты от сил инерции 1-го и 2-го порядков и вращающихся масс;
 m_I – неуравновешенные моменты сил инерции НВМ и ПДМ

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = 1,3092 \text{ с}^{-1} \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{R}{L} = \frac{0,15402}{0,61} = 0,2525 \tag{4}$$

Внешняя неуравновешенность [6]:

Таблица 2

Исходные данные					
№	Наименование		Значение	Ед.изм.	
1	Неуравновешенные моменты от сил инерции	1-го порядка	m_I	0,449	
2		2-го порядка	m_{II}	4,9798	
3	Масса	двигателя	M	8900	кг
4		поршня	$M_{П}$	77	кг
5		шатуна	$M_{Ш}$	63	кг
6		колена	M_K	128	кг
7	Радиус кривошипа		R	0,15402	м
8	Диаметр поршня		D	0,250	м
9	Расстояние между цилиндрами		L_0	0,390	м
10			n	750	об/мин
11	Длина	двигателя	L	3,077	м
12	Высота		H	2,225	м
13			L_S	0,403	м
14			L_R	0,217	м

$$M_{ШR} = M_{Ш} \frac{L_S}{L} = 63 \cdot \frac{0,403}{0,620} = 40,95 \text{ кг} \tag{5}$$

$$K = 0,2 \left[(0,001 \cdot n)^2 + 2 \right] / \left[(0,001 \cdot n)^2 + 1 \right] = 0,328 \tag{6}$$

$$M_{ШS} = K \cdot M_{Ш} = 0,328 \cdot 63 = 20,664 \text{ кг} \tag{7}$$

$$M_S = M_{П} + M_{ШS} = 77 + 20,664 = 97,664 \text{ кг} \tag{8}$$

$$M_R = M_K + M_{LR} = 128 + 40,95 = 168,95 \text{ кг} \quad (9)$$

Амплитуды сил инерции этих масс [4]:

$$P_I = M_S R \omega^2 = 97,664 \cdot 0,15402 \cdot (1,3092)^2 = 25,782 \text{ мН} \quad (10)$$

$$P_{II} = \lambda M_S R \omega^2 = 0,2525 \cdot 97,664 \cdot 0,15402 \cdot (1,3092)^2 = 6,51 \text{ мН} \quad (11)$$

$$P_T = M_R R \omega^2 = 168,95 \cdot 0,15402 \cdot (1,3092)^2 = 44,602 \text{ мН} \quad (12)$$

Неуравновешенный момент сил инерции [4]:

$$M_I = m_I P L_0 = 0,449 \cdot 25,782 \cdot 0,390 = 4,514 \text{ Н} \quad (13)$$

$$M_{II} = m_{II} P_{II} L_0 = 4,9798 \cdot 6,51 \cdot 0,390 = 12,643 \text{ Н} \quad (14)$$

$$M_T = m_T P_T L_0 = 0,449 \cdot 44,602 \cdot 0,390 = 7,81 \text{ Н} \quad (15)$$

$$\xi = \frac{1}{8900 \cdot 0,25 \cdot 1,714} \left[25,782 + (0,25 \cdot 6,51) + \frac{6 \cdot 3,077 \cdot (4,514 + (0,25 \cdot 12,643))}{(3,077)^2 + (2,225)^2} \right] = 0,0097 \quad (16)$$

$$\eta = \frac{1}{8900 \cdot 0,25 \cdot 1,714} \left[44,602 + \frac{6 \cdot 3,077 \cdot 7,81}{(3,077)^2 + (2,225)^2} \right] = 0,014 \quad (17)$$

Согласно критериям Каца А.М. [4, 5], если эти критерии оказываются меньше 0,002, то двигатели следует считать хорошо уравновешенными, а если больше 0,01 – плохо уравновешенными. Из расчета критерия неуравновешенности видно, что значения ξ и η больше, чем 0,002 и 0,01. Поэтому двигатель нельзя амортизировать низкочастотными виброизоляторами.

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований вибрации общей несущей рамы показывает, что причина образования трещин в

районе маховика связана с резонансными явлениями, возникающими во время работы дизель-генератора, в колебательных системах «агрегат – виброизоляторы» и «ротор генератора – маховик – коленчатый вал».

Двигатель не отвечает численным безразмерным критериям Каца А.М. по неуравновешенности поршневых двигателей.

Для устранения повышенной вибрации и предотвращения трещин полок несущей общей рамы необходимо на основе расчета амортизации установить ДГА на новые опорные виброизоляторы, а также увеличить жесткость рамы.

Литература

1. Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Повышенная вибрация на рефрижераторных судах проекта В437/11 и технические предложения по её снижению // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3. с. 58–69.
2. Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Экспериментальная оценка вибрационной эффективности общей системы амортизации дизеля 2Ч8,5/11 с гидротормозом, смонтированной на общей-несущей раме с торообразными канатными виброизоляторами // Морские интеллектуальные технологии, СПб, № 4(42)т.1 2018. с. 161-167.
3. Минасян М. А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Стальные канатные упругие связи судовых дизельных энергетических установок и их элементов // Морские интеллектуальные технологии, СПб, том 2 (40) 2018. с. 85-93.
4. Истомин П.А. Динамика судовых двигателей внутреннего сгорания / П. А. Истомин. – Л.: Судостроение, 1964. – 288 с.
5. Яманин А.И., Жаров А.В. Динамика поршневых двигателей: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2003. 464 с.
6. Радченко В.А., Румб В.К., Медведев В.В. Расчет неуравновешенности поршневых двигателей на персональной ЭВМ: Методические указания. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2001. – 38 с.

References

1. Minasjan M.A., Aung M'o Thant, Minasjan A.M. Povyshennaja vibracija na refrizheratornyh sudah proekta V437/11 i tehnicheckie predlozhenija po ejo snizheniju // Vestnik AGTU. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. 2018. № 3. s. 58–69.
2. Minasjan M.A., Aung M'o Thant, Minasjan A.M. Jeksperimental'naja ocenka vibracionnoj jeffektivnosti obshej sistemy amortizacii dizelja 2Ch8,5/11 s gidrotormozom, smontirovannoj na obshej-nesushhej rame s toroobraznymi kanatnymi vibroizoljatorami // Morskije intellektual'nye tehnologii, SPb, № 4(42)t.1 2018. s. 161-167.
3. Minasjan M. A., Aung M'o Thant, Minasjan A.M. Stal'nye kanatnye uprugie svjazi sudovyh dizel'nyh jenergeticeskih ustanovok i ih jelementov // Morskije intellektual'nye tehnologii, SPb, tom 2 (40) 2018. s. 85-93.
4. Istomin P.A. Dinamika sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoranija / P. A. Istomin. – L.: Sudostroenie, 1964. – 288 s.
5. Jamanin A.I., Zharov A.V. Dinamika porshnevnyh dvigatelej: Uchebnoe posobie. – M.: Mashinostroenie, 2003. 464 s.
6. Radchenko V.A., Rumb V.K., Medvedev V.V. Raschet neuravnoveshehnosti porshnevnyh dvigatelej na personal'noj JeVM: Metodiceskie ukazanja. – SPb.: Izd. SPbGMTU, 2001. – 38 s.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

УДК 539.3

**ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЕ НА
ЕЕ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ****Сергей Михайлович Балабаев**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Высшая математика»
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52-Б
e-mail: ivinanata@yandex.ru

Наталья Федоровна Ивина

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Математика»
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
690062, г. Владивосток, Камский пер., 6
e-mail: ivinanata@yandex.ru

Аннотация

Комбинированным методом конечных и граничных элементов решена задача анализа излучения гидроакустической антенны, состоящей из двух водозаполненных пьезоцилиндров с радиальной поляризацией с учетом их акустического взаимодействия. Рассмотрены частотные характеристики чувствительности, распределения давления и колебательной скорости на цилиндрических поверхностях пьезоцилиндров. Показано, что акустическое взаимодействие оказывает значительное влияние на характеристики антенны. При малом волновом расстоянии между цилиндрами в антенне проявляется себя антисимметричная по высоте цилиндра мода. Эта мода искажает частотные характеристики чувствительности, а также вызывает большие механические напряжения на плоскости симметрии цилиндра, которые могут привести к разрушению пьезоцилиндров. Поэтому при разработке гидроакустических антенн необходим тщательный подбор как геометрических размеров пьезопреобразователей, так и расстояния между ними.

Ключевые слова: гидроакустическая антенна, пьезопреобразователь, метод конечных элементов, метод граничных элементов.

**THE INFLUENCE OF ACOUSTIC INTERACTION
OF THE PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS IN HYDROACOUSTIC
ANTENNA AT ITS BASIC CHARACTERISTICS****Sergey M. Balabaev**

Professor, Dr. Sci. Phys.-Math., Professor of department of Higher mathematics
Far Eastern State Technical Fisheries University
52-B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia
e-mail: ivinanata@yandex.ru

Natalia F. Ivina

Associate professor, Dr. Sci. Tech., Associate professor of department of Mathematics
Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
6, Kamsky per., Vladivostok, 690062, Russia
e-mail: ivinanata@yandex.ru

Abstract

The problem of analysis of radiation of the hydro-acoustic antenna consisting of two water-filled piezocylinders with radial polarization taking into account their acoustic interaction is solved by the combined method of finite and boundary elements. The frequency characteristics of the sensitivity, the distribution of pressure and the vibrational velocity on the cylinder surfaces of the piezocylinders are considered. It is shown that the acoustic interaction has a significant effect on the antenna characteristics. With a small wave distance between the cylinders in the antenna manifests itself antisymmetric height of the cylinder mode. This mode distorts the frequency characteristics of the sensitivity, and also causes large mechanical stresses on the plane of symmetry of the cylinder, which can lead to the destruction of the piezocylinders. Therefore, the development of hydroacoustic antennas requires a careful selection of both the geometrical dimensions of the piezoelectric transducers and the distance between them.

Key words: hydroacoustic antenna, piezoelectric transducer, finite element method, boundary element method.

Введение

Гидроакустическая аппаратура является важной частью радиоэлектронного оборудования подводных и надводных кораблей и подводных аппаратов различного назначения. Гидроакустическая антенна является обязательным элементом любой гидроакустической станции и от ее эффективной работы в значительной степени зависит эффективность работы станции в целом. Обычно антенна состоит не из одного, а из нескольких пьезопреобразователей, акустическое взаимодействие которых может оказать значительное влияние на ее характеристики.

Гидроакустическая антенна из нескольких водозаполненных пьезоцилиндров с радиальной поляризацией экспериментально исследована в статье [1]. Опытным путем показано, что частотная характеристика чувствительности в режиме излучения таких пьезоцилиндров имеет два близко расположенных максимума на частотах объемного и радиального резонансов. Также установлено, что для получения равномерной широкополосной частотной характеристики пьезоцилиндры должны располагаться на определенном расстоянии друг от друга. Эта работа стимулировала большой интерес акустиков к разработке математических моделей водозаполненного пьезоцилиндра, являющегося двухрезонансным широкополосным гидроакустическим преобразователем, анализу и оптимизации его параметров [2-4]. Как отмечено в статье [4], эта задача является «интересной и содержательной задачей акустики, имеющей богатую историю».

В традиционной постановке задачи об излучении звука антенной исходят из допущения, что на поверхностях ее излучающих элементов заданы постоянные смещения или колебательные скорости. Это принципиально исключает полное исследование акустического взаимодействия пьезопреобразователей антенны на ее характеристики. Для возможности исследования этого взаимодействия необходимо решение «сквозной» задачи (в терминологии автора статьи [4]), когда задается электрическое напряжение, подаваемое на пьезопреобразователи антенны, и учитывается весь процесс преобразования электрической энергии в энергию излучения. Однако эта задача является весьма сложной и все попытки ее решения аналитическими методами даже для простейших антенн в идеализированной постановке привели только к частичному успеху.

В статье [4] модифицированным методом частичных областей исследована задача об излучении звука антенной, состоящей из нескольких радиально поляризованных водозаполненных пьезоцилиндров при фиксированном расстоянии между ними. Принципиальные ограничения в постановке задачи: распределение колебательной скорости по высоте каждого цилиндра является постоянным и учитывается только радиальная мода колебаний цилиндра. Хотя известно [5], что вблизи радиальной моды колебаний пьезоцилиндра находятся антисимметричная и изгибная по высоте цилиндра моды, которые являются паразитными и могут оказывать значительное влияние на характеристики излучения [6].

Ограниченные возможности аналитических методов приводят к тому, что многие вопросы разработки антенн можно решить только опытным путем, что связано с большими затратами времени и материалов. Известно, например, что при разработке и изготовлении низкочастотных гидроакустических антенн из секционированных крупногабаритных цилиндрических преобразователей потребовались большие, длительные и весьма дорогостоящие экспериментальные исследования. Вопрос об оптимальности конструкции при этом остается открытым, так как обычно невозможно исследовать все варианты.

1. Методы решения

Компьютерное моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ) и метода граничных элементов (МГЭ) позволяет анализировать реальную конструкцию при варьировании ее параметров и таким образом значительно ускорить и удешевить разработку высокоэффективных пьезопреобразователей и антенн. В данной работе применена модификация ранее разработанного комбинированного метода конечных и граничных элементов [7]. В комбинированном методе преобразователи моделируются пьезоэлектрическими конечными элементами. Для учета акустического излучения используется граничное интегральное уравнение Гельмгольца, которое определяет давление в произвольной точке пространства, если известны распределения давления и колебательной скорости на поверхностях пьезопреобразователей. Уравнение Гельмгольца интегрируется численно с использованием граничных элементов с квадратичной аппроксимацией. Применение комбинированного метода позволяет моделировать антенны в точной постановке и учесть все эффекты, которые принципиально не могут быть учтены при использовании аналитических методов.

Как показано в статье [7] комбинированный метод конечных и граничных элементов приводит к системе двух матричных уравнений большой размерности относительно узловых смещений и давления. Возможна и модификация окончательной записи комбинированного метода в виде одного матричного уравнения с введением импедансной матрицы [8]:

$$\left([H_{uv}] - \omega^2 [M] + i\omega [C] + i\omega [W][Z][W]^T \right) \{u_i\} = \{H_{uv}\},$$

где $[H_{uv}]$ - глобальная матрица жесткости с учетом пьезоэффекта; $[M]$ - глобальная матрица массы; $[C]$ - демпфирующая матрица, учитывающая механические потери; $[W]$ - матрица направляющих косинусов внешней единичной нормали в узловых точках; $[Z]$ - матрица импеданса излучения; $\{H_{uv}\}$ - глобальная матрица-столбец (вектор) пьезоэлектрической «жесткости»; $\{u_i\}$ - вектор узловых смещений; ω - круговая частота; i - мнимая единица; символ T означает транспонирование. Матрицу импеданса излучения

можно получить, как отношение силы к скорости узловых точек [8]:

$$[Z] = -i\omega\rho[S][A]^{-1}[B],$$

где ρ - плотность воды; $[S]$ - диагональная матрица площади; $[A]$ и $[B]$ - глобальные матрицы МГЭ, полученные специальным суммированием соответствующих элементарных матриц.

Импеданс излучения зависит от частоты и геометрической формы преобразователя. При использовании классических одномерных моделей импеданс – скалярная величина, которая характеризует реакцию акустической среды и равна отношению силы, действующей на излучающую поверхность, к ее колебательной скорости. Если излучающая поверхность представлена граничными элементами с узловыми точками, то можно определить собственный и взаимный импеданс каждой точки (точнее небольшого участка с этой точкой) и сформировать импедансную матрицу.

2. Результаты и обсуждение

Рассмотрим антенну из двух одинаковых соосных водозаполненных пьезоцилиндров с радиальной поляризацией из пьезокерамики ЦТБС-3, соединенных параллельно. Параметры пьезокерамики соответствуют справочным данным [9]. Размеры антенны задаются относительными, нормированными на внешний радиус цилиндра r , величинами: h - безразмерная высота каждого цилиндра, d - толщина его стенки, b - расстояние между цилиндрами. На основе разработанного алгоритма создан пакет прикладных программ, позволяющий вычислить все характеристики гидроакустической антенны при изменении ее геометрических размеров.

Для этой антенны при варьировании ее размеров рассчитаны частотные характеристики чувствительности в режиме излучения в точке дальнего поля на плоскости симметрии антенны (в дБ относительно уровня 1 мкПа/В при 1 м), частотные характеристики безразмерной активной составляющей акустической мощности, нормированные диаграммы направленности в вертикальной плоскости и распределения давления и нормальной компоненты колебательной скорости на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях верхнего пьезоцилиндра.

Ранее [6, 7] для одиночного водозаполненного пьезоцилиндра (двухрезонансной системы) было введено понятие оптимальных геометрических размеров. Под оптимальными размерами понимаются размеры, при которых чувствительность излучения на объемном и радиальном резонансах примерно одинакова, а неравномерность частотной характеристики невелика (не превышает 3 дБ).

На рис. 1 приведены частотные характеристики чувствительности в режиме излучения ν одиночного пьезоцилиндра и гидроакустической антенны из двух цилиндров при изменении расстояния между цилиндрами при размерах близких к оптимальным. По оси абсцисс отложена безразмерная частота kr , k – волновое число поперечной волны в пьезокерамике. Для радиально поляризованного пьезоцилиндра с толщиной стенки

$d=0,2$ оптимальная высота равна примерно 0.8 (рис. 1, кривая 1).

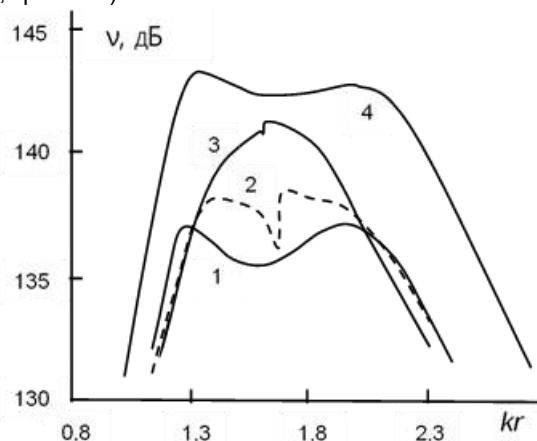


Рис. 1. Частотные характеристики чувствительности в режиме излучения при $d=0,2$: 1 – одного цилиндра, $h=0,8$; 2 – 4 – антенны: 2 – $b=0,15$, $h=0,4$; 3 – $b=0,7$, $h=0,4$; 4 – $b=2,5$, $h=0,8$

Максимальная чувствительность в режиме излучения $\nu_{max} \approx 137$ дБ, т. е. меньше, чем у тангенциально поляризованного пьезоцилиндра [7]. Это объясняется тем, что секционированный пьезоцилиндр работает на продольном пьезоэффекте, а радиально поляризованный – на поперечном. Поэтому в первом случае коэффициент электромеханической связи больше, чем во втором. Это хорошо известно из приближенной одномерной теории и из практики. Отметим, что для пьезоцилиндра с меньшей толщиной стенки ($d=0,15$) оптимальная высота равна примерно 1.1 [6]. Таким образом, толщина стенки цилиндра, которая не учитывается в аналитических моделях (например, в [2]) оказывает значительное влияние на его характеристики излучения.

В спектре собственных частот пьезоцилиндра оптимальной высоты вблизи рассматриваемого частотного диапазона присутствуют три первые моды колебаний: антисимметричная, симметричная и изгибная. Частоты резонанса и значения коэффициента электромеханической связи (s) этих мод следующие: антисимметричная мода: $kr=1,95$, $s=0$; симметричная мода: $kr=2,01$, $s=0,346$; изгибная мода: $kr=3,96$, $s=0,026$. Изгибная по высоте пьезоцилиндра мода возбуждается слабо, и она расположена выше рассматриваемого частотного диапазона. Антисимметричная по высоте цилиндра мода не возбуждается в одиночном пьезоцилиндре.

Из анализа частотных характеристик (рис. 1 и подобные) можно сделать следующие выводы.

При малом расстоянии между пьезоцилиндрами антенна из двух цилиндров оптимальной высоты не дает увеличения чувствительности излучения на 6 дБ (в два раза) это объясняется сильным акустическим взаимодействием между пьезоцилиндрами. Частотная характеристика с двумя максимумами, характерными для одиночного пьезоцилиндра, в антенне может формироваться не всегда, а только при малом расстоянии между цилиндрами и большом (когда их акустическое взаимодействие почти не сказывается). Между этими расстояниями частотные характеристики с двумя

максимумами не формируются, это приводит к уменьшению ширины полосы излучения. Оптимальная высота пьезоцилиндров в антенне зависит от расстояния между ними и при малом расстоянии составляет примерно половину оптимальной высоты одиночного цилиндра.

Акустическое взаимодействие между пьезоцилиндрами почти не сказывается на расстоянии $b > 2.5$, при этом частотные характеристики по форме близки к частотным характеристикам одиночного пьезоцилиндра, чувствительность излучения увеличивается на 6 дБ. Отметим, что длина волны в жидкости на частоте радиального резонанса пьезоцилиндра составляет $2.5r$.

Немонотонность на частотной характеристике (резкий минимум) при $kr \approx 1.7$ (рис.1, кривая 2) объясняется влиянием антисимметричной моды, которая искажает частотные характеристики чувствительности в режиме излучения. В одиночном пьезоцилиндре со сплошными электродами, находящемся в бесконечном пространстве антисимметричная мода не возбуждается (механически и электрически симметричная задача). Проявление антисимметричной моды в гидроакустической антенне объясняется акустическим взаимодействием пьезоцилиндров, которое приводит к асимметрии распределения скорости и давления на излучающих цилиндрических поверхностях во всей рабочей полосе частот. Наиболее сильно антисимметричная мода проявляет себя при большом акустическом взаимодействии (малом расстоянии между пьезоцилиндрами). При увеличении этого расстояния акустическое взаимодействие уменьшается, это приводит к уменьшению влияния антисимметричной моды на частотные характеристики.

Для одного пьезоцилиндра распределения модулей нормальной компоненты колебательной скорости и давления на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях имеют следующий вид [6, 8]: соответствующие кривые имеют максимум на середине цилиндра и плавно спадают к его краям. В антенне при наличии акустического взаимодействия эта симметрия нарушается: максимум кривой давления смещается от середины к краю пьезоцилиндра. Особенно сильно сказывается акустическое взаимодействие на распределение колебательной скорости на частотах вблизи антисимметричной моды. На рис. 2 приведены типичные распределения модуля безразмерной нормальной компоненты колебательной скорости на внешней и внутренней цилиндрических поверхностях верхнего пьезоцилиндра антенны на трех частотах. По оси абсцисс отложены номера узловых точек на цилиндрических поверхностях. Первые 13 точек расположены на внешней поверхности снизу вверх, последующие 13 точек - на внутренней поверхности сверху вниз. Точки расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, причем точки 7 и 20 находятся на плоскости симметрии пьезоцилиндра.

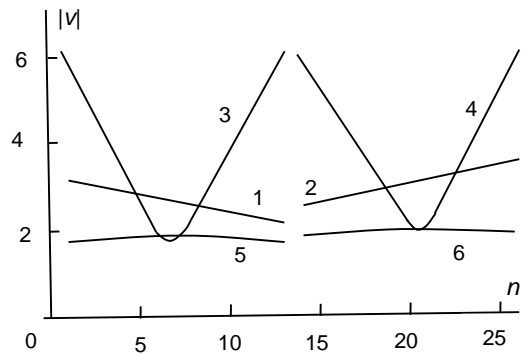


Рис.2. Распределения модуля нормальной компоненты колебательной скорости на внешней ($n=1 - 13$) и внутренней ($n=14 - 26$) цилиндрических поверхностях, $b=0.15$, $h=0.4$: 1,2 - $kr=1.45$; 3, 4 - $kr=1.7$; 5, 6 - $kr=1.9$

Рассмотрение форм распределения модулей нормальной колебательной скорости и давления на излучающих цилиндрических поверхностях показывает, что при малом расстоянии между пьезоцилиндрами (сильном акустическом взаимодействии) они значительно отличаются от соответствующих форм для одиночного пьезоцилиндра оптимальной высоты, а также значительно меняются с изменением частоты при фиксированных геометрических размерах. Характерным является то, что акустическое взаимодействие между пьезоцилиндрами в гидроакустической антенне приводит к асимметрии распределения нормальной компоненты колебательной скорости и давления относительно плоскости симметрии пьезоцилиндра. Для антисимметричной моды характерно противофазное относительно плоскости симметрии цилиндра распределение нормальной колебательной скорости на цилиндрических поверхностях. По этой причине модуль колебательной скорости имеет минимум на середине цилиндра, а на его концах достигает значительной величины (рис. 2, кривые 3, 4). При подобном распределении колебательной скорости в пьезокерамике вблизи плоскости симметрии цилиндра будут создаваться большие механические напряжения, которые могут привести к разрушению пьезоцилиндра. Такие проблемы наблюдались при разработке и испытаниях низкочастотных гидроакустических антенн из крупногабаритных секционированных (склеенных из отдельных призм) пьезоцилиндров.

Заключение

Проведенный анализ характеристик цилиндрической гидроакустической антенны позволяет сделать следующие основные выводы.

При разработке антенн необходим тщательный подбор как геометрических размеров пьезопреобразователей, так и расстояния между ними. Это позволит избежать влияния паразитных мод (в данном случае – антисимметричной), которые искажают характеристики гидроакустической антенны и могут привести к разрушению входящих в нее пьезопреобразователей.

В заключение также отметим, что при заполнении пьезоцилиндра легким материалом с небольшим акустическим сопротивлением, он обладает частотной характеристикой с двумя максимумами и его можно использовать в широкополосных гидроакустических антеннах [10, 11].

Литература

1. McMahon G.W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1964. V. 36. № 3. P. 528-533.
2. Rogers P.H. Mathematical model for a free-flooded piezoelectric cylinder transducer. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1986. V. 80. № 1. P. 13-18.
3. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 304 с.
4. Вовк И.В. Излучение звука конечной решеткой, состоящей из открытых цилиндрических пьезокерамических оболочек. *Акуст. журн.* 1992. Т.38. № 3. С. 427-434.
5. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф., Шишлов К.Н. Спектр собственных частот конечной пьезокерамической оболочки. *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 5. С. 702-703.
6. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение водозаполненной пьезокерамической оболочки. *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 3. С. 293-300.
7. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ пьезопреобразователей комбинированным методом конечных и граничных элементов. *Акуст. журн.* 1996. Т. 42. № 2. С. 172-178.
8. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Компьютерное моделирование колебаний и излучения тел конечных размеров (методы конечных и граничных элементов). Владивосток: Дальнаука, 1996. 213 с.
9. Пьезокерамические преобразователи. /Под ред. С.И.Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
10. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Акустическое излучение цилиндрического пьезопреобразователя с внутренним твердым заполнением. *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 4. С. 450-453.
11. Balabaev S.M., Ivina N.F. Computer modeling and analysis of a cylindrical piezoceramic transducer with interior solid filling. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1999. V. 106. № 4. P. 2196.

References

1. McMahon G.W. Performance of open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1964. V. 36. № 3. P. 528-533.
2. Rogers P.H. Mathematical model for a free-flooded piezoelectric cylinder transducer. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1986. V. 80. № 1. P. 13-18.
3. Shenderov E.L. Izluchenie i rasseyanie zvuka. Leningrad. Sudostroenie. 1989. 304 s.
4. Vovk I.V. Sound radiation by a finite grating formed by free-flooding piezoelectric cylinder shells. *Acoustical Physics.* 1992. V. 38. № 3. P. 427-434.
5. Balabaev S.M., Ivina N.F., Shishlov K.N. Eigenfrequency spectrum of a finite piezoceramic shell. *Acoustical Physics.* 2000. V. 46. № 5. P. 616-617.
6. Balabaev S.M., Ivina N.F. Acoustic radiation of a free-flooded piezoceramic shell. *Acoustical Physics.* 1999. V. 45. № 3. P. 253-259.
7. Balabaev S.M., Ivina N.F. A mixed finite element-boundary element method in an analysis of piezoceramic transducers. *Acoustical Physics.* 1996. V. 42. № 2. P. 149-154.
8. Balabaev S.M., Ivina N.F. Komp'yuternoe modelirovanie kolebanij i izlucheniya tel konechnyh razmerov (metody konechnyh i granichnyh ehlementov). Vladivostok: Dal'nauka, 1996. 213 s.
9. P'ezokeramicheskie preobrazovateli. Pod red. S.I. Pugacheva. Leningrad. Sudostroenie. 1984. 256 s.
10. Balabaev S.M., Ivina N.F. Acoustic radiation of a cylindrical piezoceramic transducer with solid internal filling. *Acoustical Physics.* 1999. V. 45. № 4. P. 398-401.
11. Balabaev S.M., Ivina N.F. Computer modeling and analysis of a cylindrical piezoceramic transducer with interior solid filling. *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 1999. V. 106. № 4. P. 2196.

УДК 534.873, 534.874.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПОД СЛОЕМ ЛЬДА

Татьяна Жановна Лобова

Аспирант кафедры Приборостроения
Дальневосточный федеральный университет;
690091, г. Владивосток, ул. Суханова 8.
e-mail: daydream_2012@mail.ru

Сюань Линьлин

Ph.D, доцент института финансов и управления
Харбинский коммерческий университет;
150040, г. Харбин, ул. Сюэ Юань, д.1
e-mail: 911076878@qq.com

Владимир Иванович Короченцев

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой Приборостроения
Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова 8.
e-mail: vkoroch@mail.ru

Владимир Владимирович Грищенко

Кандидат технических наук
доцент кафедры Приборостроения
Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова 8.
E-mail: vvg45@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена теоретическим проблемам расчета исследовательских, рыбопоисковых, гидроакустических приборов для подводных и надводных судов и подводных аппаратов.

Как правило, анализ антенн их работы, действия, сводится к решению волновых уравнений (уравнений Гельмгольца), которые при соответствующих граничных условиях позволяют свести к устойчивым алгоритмам. Такой подход к расчету антенн приводит к сложности восприятия единого алгоритма разработки теории антенн. Специалистам в таком случае приходится применять разные методики расчета для одной практической задачи – разработки оптимальной конструкции направленной системы.

В настоящей статье рассмотрен математический алгоритм, основанный на теории функций Грина, который позволяет значительно сократить время расчета на компьютере средней мощности.

Для иллюстрации удобства такого метода расчета приводится поле ненаправленного источника. Показано, что предложенный алгоритм можно использовать для анализа поля точечного излучателя.

Ключевые слова: теория функций Грина, поле гидроакустического излучателя, погрешности, точечный излучатель, математическая модель расчета; гидроакустическое поле, математический алгоритм.

RESEARCH OF THE FIELD OF A HYDROACOUSTIC RADIATOR UNDER THE ICE LAYER

Tatyana Zh. Lobova

Postgraduate student of the Department of Instrument Engineering
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova St., 8
e-mail: daydream_2012@mail.ru

XUAN LINLIN

Ph.D, Associate Professor of the College of Finance and Public Administration
of Harbin University of Commerce
150040, Harbin, Xue Yuan St., 1
e-mail: 911076878@qq.com

Vladimir I. Korochencev

Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Instrument Engineering
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova St., 8
e-mail: vkoroch@mail.ru

Vladimir V. Grishchenko

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Biotechnology and Functional Nutrition
Far Eastern Federal University
690091, Vladivostok, Sukhanova St., 8
e-mail: vvg45@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to the theoretical problems of calculating methods for scientific, fish detection and sonar instruments for underwater and surface vessels and underwater vehicles.

As a rule, the analysis of their antennas performance and operation, is limited to solving wave equations (Helmholtz equations), which, under appropriate boundary conditions, can be reduced to stable algorithms. This approach to the calculation of antennas leads to the complexity of perception of a single algorithm for the development of the theory of antennas. Specialists in this case have to apply different calculation methods for one practical task - the development of an optimal design of a directional system.

This article describes a mathematical algorithm based on the theory of Green's functions, which can significantly reduce the computation time on a medium scale computer.

The field of non-directional source is used to illustrate the convenience of this method of calculation. It has been demonstrated that the proposed algorithm can be used to analyze the field of a point-source radiator.

Key words: the theory of Green's functions, field of an underwater sound projector, errors, point-source radiator, mathematical model of calculation; hydroacoustic field, mathematical algorithm.

Введение

Расчет поля излучающих антенных решеток (анализ антенн), расположенных в морском клине, проводился с 1967 по 2018-е годы. Рассмотрены различные типы вертикально и горизонтально ориентированных антенных решеток при идеальных и импедансных граничных условиях [2]. При этом применялись численные, аналоговые и комбинированные методы расчета. Несмотря на то, что авторы работ применяли разные математические модели, для их расчета на мощных компьютерах требовалось длительное время (десятки минут). При этом использованные в статьях модели дают результаты, отличающиеся друг от друга на большую величину. Сравнение теорий с экспериментами также не всегда является достоверным из-за больших погрешностей измерения в реальных морских условиях.

Задача анализа антенной решетки [1,2] может быть сведена к суммированию функций Грина, а задачи синтеза [3,4] – к определению колебательной скорости на элементах антенны по заданной диаграмме направленности. Для свободного полупространства эти задачи подробно рассмотрены в статьях по теории антенн.

Решение задач анализа для антенн, расположенных в мелком море, с неоднородными по углу граничными условиями в классической постановке приводит к громоздким математическим выражениям и, соответственно, большому времени расчета.

В реальных морских условиях границы по угловым координатам различны (дно, поверхность моря, свободное волноводное полупространство и т.д.).

1. Математическая модель и ее экспериментальная проверка

Целью настоящей статьи является разработка математической модели анализа поля точечного излучателя, расположенного в замкнутом объеме (мелком море), ограниченном дном моря и ледовым покровом, которая позволяет на компьютерах

средней мощности в течении 1-2 минут получать результаты приемлемые для практического применения в реальных условиях.

Рассмотрим постановку следующей задачи анализа точечного излучателя, в морском полупространстве со слоем льда на поверхности. Такая задача может быть принята за исходную при расчете гидроакустических излучателей, расположенных в океане с ледовым покровом.

Предположим, известны акустические характеристики (плотность и фазовая скорость) льда, воды, воздуха, координаты элементов точечного излучателя. Поле точечного излучателя, можно определить давлением в океане.

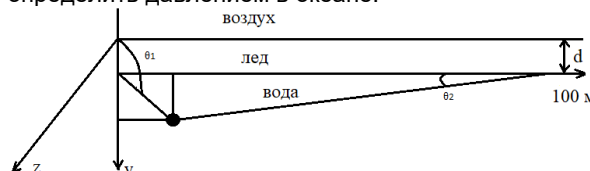


Рис. 1. Геометрия задачи анализа точечного излучателя.

Основной сложностью при решении такой задачи является невозможным выполнить разделение переменных в уравнении Гельмгольца и удовлетворить граничным условиям. В настоящей статье предлагается использовать метод направленной функции Грина [1]. Эта функция позволяет разделить переменные для простейших поверхностей, совпадающих с одной из ортогональных систем координат.

Если реальная поверхность подводной части шельфа не совпадает с одной из ортогональных систем координат, то отдельные участки, будем аппроксимировать некоторыми участками, совпадающими с ортогональными координатными поверхностями. Используя выражения для «направленной функции Грина» запишем следующее выражение (функция Грина свободного пространства):

$$P = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{U_{min}}^{U_{max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{i((x-x_0)\sqrt{k^2 - U^2} + (y-y_0)U)} dU \right] \quad (1)$$

Интервалы углов $[U_{min} = k \sin \theta_1, U_{max} = k \sin \theta_2]$, из них видны в геометрическом приближении, соответственно, границы ледового покрова (рис. 1).

$$F(U) = \begin{cases} 1 & \text{if } U_{min} \leq U < U_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Окончательное выражение для функции Грина учитывающей коэффициент отражения от ледовой поверхности видной в лучевом приближении:

$$P = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{U_{min}}^{U_{max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{i((x-x_0)\sqrt{k^2 - U^2} + (y-y_0)U)} dU + \int_{U_{min}}^{U_{max}} V \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{-i((x-x_0)\sqrt{k^2 - U^2} + (y-y_0)U)} dU \right] \quad (2)$$

Где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число,

V – коэффициент отражения.

F(U) – функция, характеризующая свойства направленных функций Грина.

Для того чтобы найти коэффициент отражения от слоя льда достаточно найти импеданс Z_1, Z_2, Z_3 на границах сред [8].

$$Z_1 = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\cos(\text{asin}(\frac{1.31}{1} \sin(\text{asin}(\frac{U}{k_2}))))}$$

Где ρ_2 -плотность льда, c_2 -скорость звука во льду, k_2 -волновое число.

$$Z_2 = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\cos(\text{asin}(\frac{1.31}{1} \sin(\text{asin}(\frac{U}{k_2}))))}$$

Где ρ_1 -плотность воды, c_1 -скорость звука в воде, k_2 -волновое число.

$$Z_3 = \frac{\rho_3 \cdot c_3}{\cos(\text{asin}(\frac{U}{k_2}))}$$

Где ρ_3 -плотность воздуха, c_3 -скорость звука в воздухе, k_2 -волновое число.

Следовательно, коэффициент отражения

$$V = \frac{(Z_2 + Z_1) \cdot (Z_1 - Z_3) \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right]^2} \right]} \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right]^2} \right]} \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]}}{(Z_2 + Z_1) \cdot (Z_1 - Z_3) \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right]^2} \right]} \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right]^2} \right]} \cdot e^{-i \left[k_2 \sin \left[\chi \left(2 \frac{\pi}{360} \right) d \right] \right]}} \quad (3)$$

Где d-толщина слоя льда.

2. Результаты расчетов

Проведем численные эксперименты с выражением (1).

Для примера рассмотрим функцию Грина для простейшего точечного источника в свободном пространстве, без учета отражения от границ.

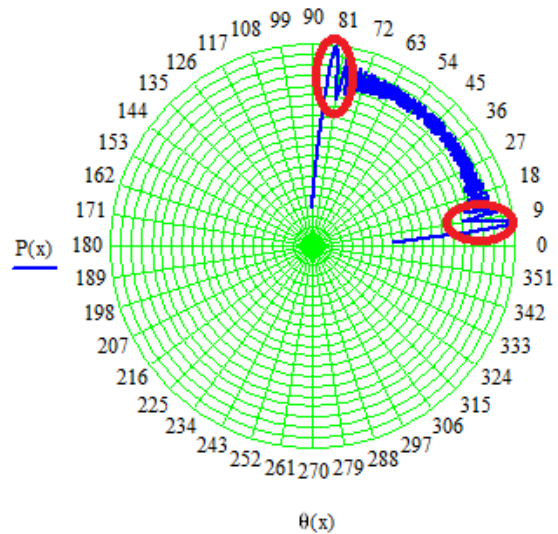


Рис. 2. «Направленная функция Грина» в свободном пространстве точечного излучателя

- Точечный излучатель с координатами (5;5) метра;
- Частота $f=2000$ Гц;
- Длина волны $\lambda=0.75$ метра;
- Углы 0 - 90 градусов;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с.

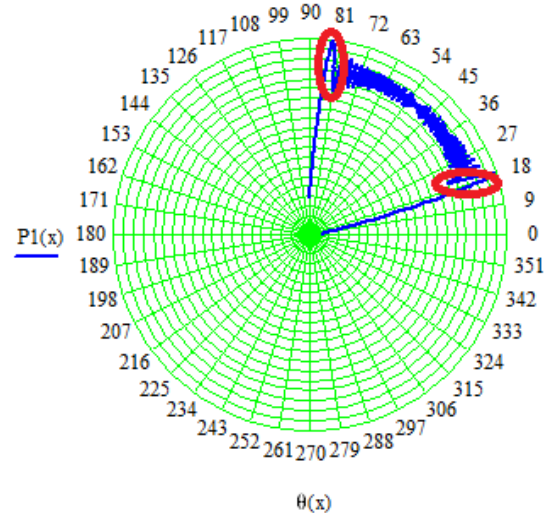


Рис. 3. «Направленная функция Грина» в свободном пространстве точечного излучателя, при коэффициентах отражения равных 0

- Точечный излучатель с координатами (5;5) метра;
- Частота $f=2000$ Гц;
- Длина волны $\lambda=0.75$ метра;
- Углы 12-90 градусов;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с.

Из рисунков 2 и 3 видно, что погрешность представления поля сферического источника по алгоритму 1, не превышает 20%. В интервале углов 80°- 90° и 0° - 15°, а в интервале 15° - 80° не превышает 5 %.

Применим алгоритм 1 и 2 для анализа поля в воде с влиянием отражения от ледовой поверхности рис 4.

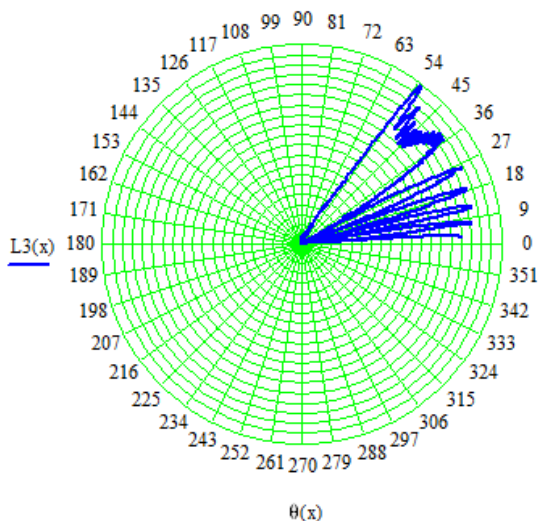


Рис. 4. Диаграмма направленности точечного источника на расстоянии 100 м

- Частота $f=2000$ Гц;
- Точечный излучатель с координатами (5;5) метра;
- Длина волны $\lambda=1.99$ метра;
- Толщина льда $d=0.1$ метра;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе 331 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны во льду 3980 м/с;
- Расстояние между излучателем и гидрофона 100 м.

Используем алгоритм (2) для расчета поля от точечного источника от расстояния x , при $y=y_0=5$ м.

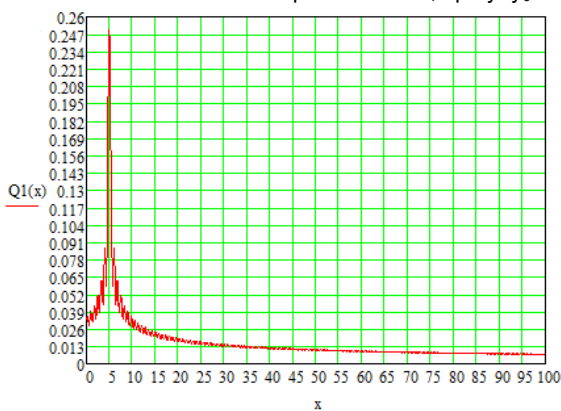


Рис. 5. Распределение давления в свободном пространстве по расстоянию x от 0 до 100 м

- Частота $f=2000$ кГц;
- Длина волны $\lambda=0.75$ метра;

- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе 331 м/с;

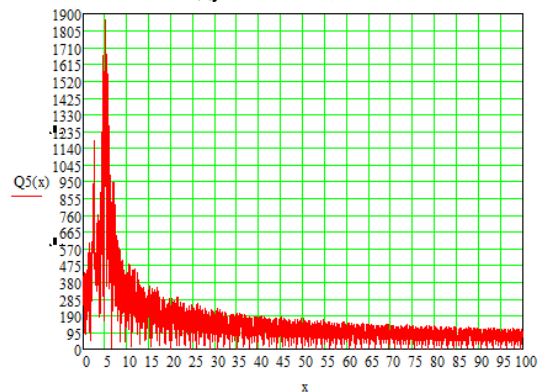


Рис. 6. Распределение давления от льда по расстоянию x от 0 до 100 м

- Частота $f=2000$ кГц;
- Точечный излучатель с координатами (5;5) метра;
- Длина волны $\lambda=1.99$ метра;
- Толщина льда $d=0.1$ метра
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе 331 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны во льду 3980 м/с;
- Расстояние между излучателем и гидрофона 100 м.

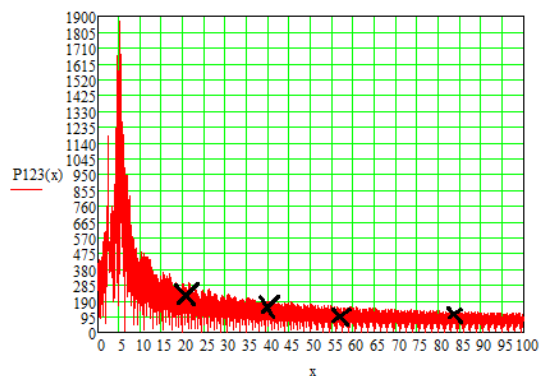


Рис. 7. Результирующая давления с учетом отражения от льда и свободного пространства по расстоянию x от 0 до 100 м

- Частота $f=2000$ кГц;
- Точечный излучатель с координатами (5;5) метра;
- Длина волны $\lambda=1.99$ метра;
- Толщина льда $d=0.1$ метра;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воде 1500 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе 331 м/с;
- Скорость распространения ультразвуковой волны во льду 3980 м/с;

- Расстояние между излучателем и гидрофона 1000 м.
- (x, x, x, x) – результаты эксперимента.

3. Обсуждение результатов

Время расчета одного варианта на ЭВМ AMD A10-5745M, применяя программный пакет Mathcad составляет ~ 1 минуту.

На рисунке 7 приведен график расчета поля точечного излучателя, ограниченном поверхностью воды покрытой льдом.

Результаты теоретических расчетов сравним с экспериментальными исследованиями, проведенными в морских реальных условиях с участием разработчиков аппаратуры А. И. Гореликова, В. А. Черненко, С. В. Горового. Результаты измерений, экспериментальные исследования средств морского приборостроения проводились на акватории б. Новик залива Петра Великого Японского моря, членами комиссии были проведены натурные испытания макета пневматического излучателя гидроакустических сигналов, разработанного и изготовленного на кафедре Приборостроения Инженерной школы ДВФУ.

В состав приемной системы входят:

Гидрофон – пьезокерамический сферический.

Линзовая антенна, представляет собой шар, заполненный жидким наполнителем, моторное масло Shell synthetic 5W30, глицерин, сферический ненаправленный приемник.

В качестве гидрофонного усилителя использовался усилитель напряжения с коэффициентом усиления $K_v = 200$, входным сопротивлением $R_{вх} = 10$ Мом и полосой пропускания на уровне -3 дБ $\Delta f = 2-4000$ Гц.

В качестве устройства регистрации принятых гидрофоном сигналов использовалось многофункциональное устройство myDAQ (National Instruments, USA), подключенное к ноутбуку. Частота дискретизации сигналов составляла 10 кГц, разрядность АЦП [5] – 16 двоичных разрядов. Для защиты от влияния изменений температуры окружающего воздуха гидрофонный усилитель, многофункциональное устройство myDAQ и ноутбук были установлены в салоне легкового автомобиля, температура в котором поддерживалась в диапазоне $15 \pm 2^\circ\text{C}$. Для регистрации сигналов и их последующего анализа использовались разработанные в инициативном порядке на кафедре приборостроения специализированные программы в среде LabView (National Instruments, USA).



Рис. 8. Внешний вид излучателя



Рис. 9. Внешний вид гидрофона



Рис. 10. Ход испытаний

Сравнение теоретических расчетов и результатов экспериментального измерения показывают их качественное совпадение.

Разработанные алгоритмы расчетов позволяют проводить анализ давления с заданной погрешностью.

Литература

1. Короченцев В.И., Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Потапенко А.А. Анализ и синтез акустических антенн в морском клине // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1. № 3 (33). С. 274-279.
2. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. М.: Дальнаука; Владивосток, 1998. 192 с.
3. Короченцев В.И. Расчет гидроакустических антенн в клине с импедансными стенками методами синтеза и анализа / Современное состояние и перспективы развития теории и прикладных вопросов гидроакустики (к 300 летию Российского флота). – Владивосток, 1996.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Из-во АН СССР, 1957. 502 с.
5. Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Перунов В.В., Чудаков А.И. Исследование пространственно-временных характеристик гидроакустических сигналов и помех с использованием объемных звукопрозрачных антенн // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15).

6. МIRONENKO M.B., МАЛАШЕНКО А.Е., ВАСИЛЕНКО А.М., КАРАЧУН Л.Э., ЛЕОНЕНКОВ Р.В. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы: монография // Владивосток, 2014. 404 с.
7. Короченцев В.И., Губко Л.В., МIRONENKO M.B., Гарасев И.В. Трёхмерная неоднородная модель в морском клине // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 10 (183). С. 65-79.
8. БРЕХОВСКИХ Л.М., ГОДИН О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. 416 с.

References

1. Korochentsev V.I., Malashenko A.E., Mironenko M.V., Potapenko A.A. Analiz i sintez akusticheskikh antenn v morskoy kline. Morskoye intellektual'nyye tekhnologii. 2016. T. 1. № 3 (33). Pp. 274-279.
2. Korochentsev V.I. Volnovye zadachi teorii napravlennykh i fokusiruyushchikh antenn. M.: Dal'nauka; Vladivostok, 1998. 192 p.
3. Korochentsev V.I. Raschet gidroakusticheskikh antenn v kline s impedantsnymi stenkami metodami sinteza i analiza. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya teorii i prikladnykh voprosov gidroakustiki (k 300 letiyu Rossiyskogo flota). Vladivostok, 1996.
4. Brekhovskikh L.M. Volny v sloistyykh sredakh. M.: Iz-vo AN SSSR, 1957. 502 p.
5. Malashenko A.E., Karachun L.E., Perunov V.V., Chudakov A.I. Issledovanie prostranstvenno-vremennykh kharakteristik gidroakusticheskikh signalov i pomekh s ispol'zovaniem ob"emnykh zvukoprozrachnykh antenn. Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika. 2013. № 1 (15).
6. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Vasilenko A.M., Karachun L.E., Leonenkov R.V. Nelineynaya prosvetnaya gidroakustika i sredstva morskogo priborostroeniya v sozdaniy Dal'nevostochnoy radiogidroakusticheskoy sistemy osveshcheniya atmosfery, okeana i zemnoy kory, monitoringa ikh poley razlichnoy fizicheskoy prirody: monografiya. Vladivostok, 2014. 404 p.
7. Korochentsev V.I., Gubko L.V., Mironenko M.V., Garasev I.V. Trekhmernaya neodnorodnaya model' v morskoy kline. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2016. № 10 (183). Pp. 65-79.
8. Brekhovskikh L.M., Godin O.A. Akustika sloistyykh sred. M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit., 1989. 416 p.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932.2, 681.516.7.015.2

**МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ КОДИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ СУДОВ****Шакиб Субхиевич Фахми**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

профессор кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53

Тел.: +7(812) 234-36-75
e-mail: shakeebf@mail.ru

Ярослав Александрович Селиверстов

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68

магистрант кафедры компьютерных систем и программных технологий, Институт компьютерных наук и технологий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21
Тел.: +7 (812) 297-16-28

e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
Тел.: +7(812) 321-95-68, e-mail: shatillen@mail.ru

Марина Сергеевна Крюкова

заместитель начальника кафедры Высшей математики и системного
моделирования сложных процессов
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России
196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149
Тел.: +79215624163, e-mail: krukova_ms@mail.ru

Язид Абдулхамид Хасан

аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53
Тел.: +7(812) 234-36-75 email: Midocom@mail.ru

Альмахрук Мухиб Махмуд Исмаил

аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53
Тел.: +7(812) 234-36-75 email: Alvfhouk@mail.ru

Константин Евгеньевич Ковалев

кандидат технических наук, доцент кафедры Логистика и коммерческая работа
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»
(ПГУПС)

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.
Тел.: 8 (812) 310-42-03, email: kovalev_kostia@mail.ru

Аннотация

Описана актуальность задач передачи изображений, анализа визуальных данных и классификации изображений морских судов. Приведена обобщенная схема видеосистемы наблюдения за морскими объектами, обеспечивающая решение проблем передачи и анализа видеоинформации в реальном времени. Предложена классификация сигналов изображений по мере неопределенности и широкополосности для создания компактной представительной выборки из различных изображений морских судов и сюжетов.

Для оценки меры неопределенности изображений предлагается использовать интегрированную оценку статистических свойств, вычисляемых в виде совокупности нормированных характеристик исходного изображения: автокорреляционная функция, дисперсия, коэффициент корреляции и др. Рассмотрены наиболее известные методы и

алгоритмы кодирования и декодирования на основе дискретного косинусного преобразования и пирамидально-рекурсивного способа нахождения ключевых точек изображений морских объектов.

Алгоритмы обработки и анализа видеoinформации строились с использованием двухпорогового определения степени корреляции соседних пикселей для определения размера полигонов, подвергающих косинусному преобразованию. Раскрываются основные этапы методов передачи и анализа изображений морских судов, такие как - первичная обработка изображений, формирование неравномерных решеток, сжатие и восстановление изображений. Представлены схемы, описывающие этапы алгоритмов кодирования и декодирования. Приведены результаты моделирования алгоритмов кодирования и декодирования изображений и получены графики зависимости точности восстановления (сигнал/шум и среднеквадратическое отклонение) от скорости передачи изображений для спектральных и пространственных методов.

Ключевые слова: классификация изображений, морские суда, кодирование, декодирование, мера неопределенности, широкополосность.

METHODS, CODING ALGORITHMS AND IMAGE CLASSIFICATION OF MARINE VESSELS

Shakeeb S. Fahmi

Dr.Tech.Sc, docent, Leading researcher
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.:+7(812) 321-95-68,

Professor of Department of Computer Aided Design Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
197376 St. Petersburg, 5, Professora Popova Street
Tel.: +7(812) 234-36-75

e-mail: shakeebf@mail.ru

Yaroslav A. Seliverstov

Phd, Senior researcher,
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68

Master student of the Department of Computer Systems & Software Engineering
Institute of Computer Science and Technology
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. Russia
195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 21
Tel.: +7 (812) 297-16-28
e-mail: seliverstov-yr@mail.ru

Natalya V. Shatalova

Phd, Leading Researcher
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,
199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13
Tel.: (812) 321-95-68, e-mail: shatillen@mail.ru

Marina S. Krukova

Deputy head of the Department Of higher mathematics and system
modeling of complex processes
Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia
196105, St. Petersburg, Maskovsky pr. 149
Тел.: +79215624163, e-mail: krukova_ms@mail.ru

Yazeed A. Hasan

postgraduate of Computer Aided Design
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
197376 St. Petersburg, 5, Professora Popova Street
Tel.: +7(812) 234-36-75, email: Midocom@mail.ru

Almahrouk M. M. Ismael

postgraduate of Computer Aided Design
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
197376 St. Petersburg, 5, Professora Popova Street
Tel.: +7(812) 234-36-75, email: Alvfrouk@mail.ru

Konstantin E. Kovalev

Phd, Associate Professor of Department of Logistics and Commerce
St. Petersburg State transport university of Emperor Alexander I
190031, Saint Petersburg, 9 Moskovsky pr.
Tel.: +7(812) 310-42-03, email: kovalev_kostia@mail.ru

Abstract

Described the urgency of the task of transferring the images, analyzing visual data and image classification of marine vessels. The generalized scheme of the video surveillance system for marine objects, providing a solution to the problems of transmission and analysis of video information in real time. The classification of image signals as uncertainty and broadband to create a compact representative sample of different images of ships and subjects.

To assess measures of uncertainty of images is proposed the use of integrated assessment of the statistical properties calculated in the form of a set of normalized characteristics of the original image: the autocorrelation function, variance, correlation coefficient, etc. is Considered the most well-known methods and algorithms of encoding and decoding based on discrete cosine transform and pyramidal-recursive method of finding the key points of images of marine objects.

Algorithms for processing and analysis of video information were built using a two-threshold determination of the degree of correlation of neighboring pixels to determine the size of the polygons subjected to cosine transformation. The main stages of the methods of transfer and analysis of images of ships, such as - primary image processing, the formation of uneven grids, compression and restoration of images. Schemes describing the stages of coding and decoding algorithms are presented. Are the results of modeling the algorithms of the encoding and decoding of images and the resulting graphs of the dependence of the reconstruction accuracy (signal-to-noise ratio and standard deviation) of the speed of transmission of images for the spectral and spatial methods.

Key words: image classification, marine vessels, encoding, decoding, a measure of the uncertainty of the broadband.

Введение

Корабельные цели являются одной из важнейших задач морского наблюдения при ведении боевых действий. При этом автоматическое обнаружение и идентификация судов имеет большое практическое значение и широко применяется как в гражданской, так и в военной областях. Ранее было проведено много исследований по обнаружению судов на изображениях радиолокаторов (РЛС) с синтезированной апертурой [1]. Эти методы имеют преимущества в том, что они мало зависят от погоды и времени, но они ограничены из-за низкого разрешения изображения и длительного периода пересмотра РЛС [2]. В последние годы, с быстрым развитием технологии оптической дистанционной визуализации, некоторые исследователи уделяют больше внимания обнаружению кораблей с оптическими изображениями из-за их более высокого пространственного разрешения и более детального пространственного содержания, по сравнению с РЛС – изображениями [3].

В работе [4] отмечено актуальность задачи учета и контроля различных транспортных средств для обеспечения безопасности портов и защиты береговой линии. А также важность проектирования видеосистем приёма и передачи информации с использованием современных технологий нанoeлектроники, обеспечивающей доставки видеoinформации в реальном времени [5].

В данной работе представлены классификация и алгоритмы функционирования видеосистемы для автоматизированного обнаружения судов. Такая система может быть оснащена цифровыми видеокамерами, расположенными на буге, на высотах береговой линии, судах и других объектах. После соответствующего анализа такая, видеосистема будет способна отправлять изображения найденных объектов центру береговой охраны портов для дальнейшей оценки и действий (рис.1).

Из теории передачи информации известно, что проблема передачи сжатого сигнала изображений заключается в том, что для его эффективной (т.е. достаточно полного соответствия результирующего изображения исходному в условиях шума и помех) и своевременной доставки необходимо восстановить результирующие изображения при сохранении заданной ошибки, а также обеспечить требуемую минимизацию скорости передачи с учётом корреляции соседних пикселей. При этом важно отметить класса изображений для которого необходимо предварительно определить статистические характеристики исходного сигнала изображения. Следовательно, для решения задачи классификации сигналов изображений, в частности, сигналов морских объектов следует учитывать и тот факт, что кодирование видеoinформации, при соблюдении определенных условий, и восстановление передаваемых сжатых видеоданных необходимо осуществлять со сколь угодно малой вероятностью ошибки (как показано в теории информации К. Шеннона) [6].

В данной работе авторами предложена классификация изображений морских объектов по двум признакам: мера неопределенности и широкополосности исходного сигнала. А также рассмотрены два представительных метода обработки и исследования создания специализированных устройств формирования и доставки видеoinформации в системах мониторинга морских акваторий:

- метод кодирования и декодирования на основе адаптивного дискретного косинусного преобразования для передачи изображений в реальном времени [7];

- метод пространственного представления на основе рекурсивного разбиения на полигоны различных форм и размера для анализа изображений [8, 9].

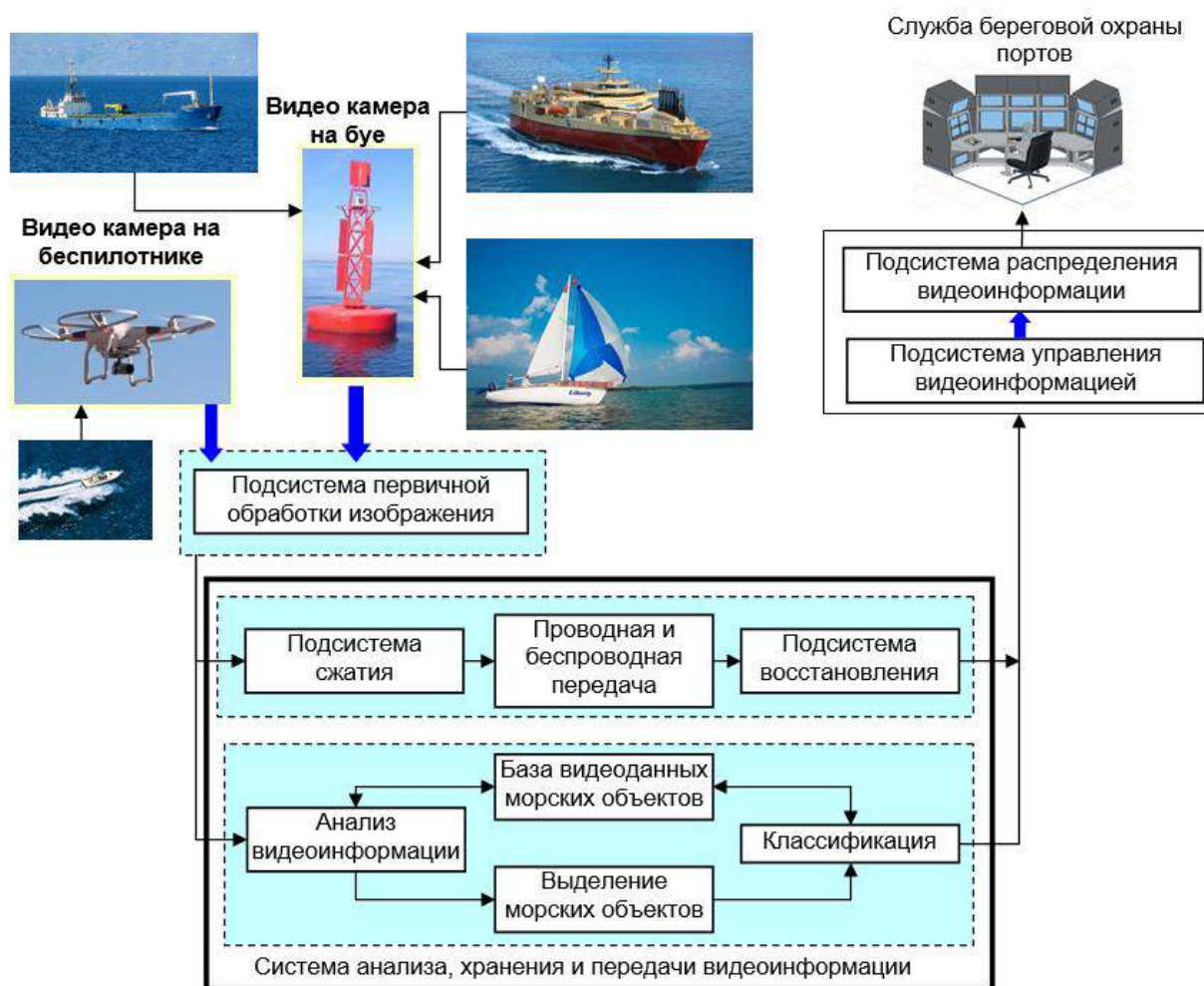


Рис. 1. Обобщенная схема видеосистемы наблюдения за морскими объектами

1. Постановка задачи классификации

Разработчики методов кодирования и декодирования видеоинформации стремятся создать универсальный способ, обеспечивающий наилучшее качество передачи сигнала с учетом его неопределенности и изменчивости статистических характеристик, как в пространстве, так и во времени при не формализованных ограничениях скорости передачи и сложности устройств кодирования [10]. Недостаток всех методов кодирования сигналов изображений заключается в том, что они не учитывают в явном виде выше указанных характеристик и свойств при постановке задачи.

Следует отметить разработчики алгоритмов считают свой вклад шагом к реализации универсального кодека, качество которого определяется экспертной оценкой [11]. Важно отметить необходимость применения важнейших результатов исследований по теории передачи информации при поиске более объективной оценки кодирования, чем известное среднее квадратическое отклонение. Нахождение критериев классификации изображений должно производиться с учётом специфики функции распределения яркостей

пикселей на изображениях морских судов, где сигнал априори характеризуется неопределенностью.

Видеоинформация о судах может быть получена из следующих основных источников наблюдения: беспилотника, камеры на буре и береговые цифровые камеры

Исследование и разработка морских технологий обнаружения и распознавания на основе программируемых систем на кристалле необходимо провести после определения выше указанных характеристик и свойств сигнала [12]. Они должны обеспечивать решения задач обработки видео, с учетом:

- априорной неопределенности статистических свойств сигнала изображений и помех (в силу необозримого разнообразия статистик эта проблема решена лишь для ряда простых наборов априорной информации, и главным достижением теории является выделение двух направлений разработки: устойчивых алгоритмов и адаптивных алгоритмов) [13];
- нестационарности кодируемых сигналов (эта проблема также как и проблема априорной неопределенности решена лишь для ряда простых наборов нестационарности, и главным достижением

теории является выделение класса кусочно-стационарных сигналов и алгоритмов обнаружения интервалов стационарности или сегментации сигналов и изображений) [14];

- сложности устройств кодирования [15].

Мера неопределенности. В настоящее время наблюдается рост потребности в анализе видеоинформации в различных областях науки и техники, таких как, транспортная безопасность, дистанционное зондирование, передача и кодирование, техническое (машинное) зрение. Следовательно, особую актуальность приобретает разработка эффективных методов, способных управлять и обрабатывать большое количество видеоданных. В частности методы, предназначенные для видеоаналитики, индексирования и извлечения видеоданных. Классические методы обработки изображений часто сталкиваются с большими трудностями при работе с изображениями, содержащими шум и помехи. В таких условиях методы с учётом неопределенности (нечеткой логики) оказываются эффективными для решения сложных реальных проблем обработки изображений. В статье [16] исследуются особенности неопределенностей в визуализации путём сегментации скалярных данных с помощью графов, что позволяет понять эту неопределенность.

Для оценки неопределенности сигналов изображений, в частности изображения морских судов, представляется целесообразным воспользоваться методологией статистической радиотехники, в которой используются понятия неопределенности в широком и узком смысле, т.е. различают процессы с постоянной/переменной дисперсией и с постоянной/переменной автокорреляционной функцией. Это подсказывает, что обобщённая мера неопределенности должна учитывать совокупное изменение статистических характеристик S_n сигнала изображения. Это могут быть математические ожидания, мода, медиана, среднее значения, дисперсии, радиусы и интервалы (или коэффициенты) корреляции, яркости и цвета и др. Каждая из статистик вычисляется для некоторых интервалов: таковые могут быть оценены по отдельным интервалам стационарности или априори компромиссно выбранным интервалам. Данные интервалы должны быть не слишком малыми для получения приемлемых методологических ошибок вычисления статистик и не слишком большими для уменьшения вероятности изменения статистик внутри интервала. Именно такие соображения лежали в основе выбора окна (4×4, 8×8 или 16×16) элементов при разработке стандартов JPEG и MPEG.

Общая мера неопределенности ξ должна вычисляться как сумма (в общем случае взвешенная) мер неопределенностей отдельных статистик: $\xi = \sum \xi_k$.

Для оценки меры неопределенности каждой статистики сигнала изображений предлагается использовать нормированную статистику, вычисляемую аналогично среднеквадратической полосе частот с тем лишь различием, что в формулу должны входить не сами сигналы, а их статистики S_n , вычисляемые раздельно по каждому аргументу. Ниже для упрощения записан один обобщённый дискретный аргумент $k \in [1, k]$. Формула для непрерывных функций непрерывного аргумента

включает отношение интегралов от квадрата производной сигнала к интегралу от квадрата самого сигнала. Для дискретных значений статистик можно использовать не производную, а первую конечную разность:

$$\xi = \frac{\sum_{k=1}^K (S_{nk} - S_{n(k-1)})^2}{\sum_{k=1}^K S_{nk}^2}$$

В данной статье для вычисления меры неопределенности рассматривается совокупность статистических характеристик исходного изображения: а) среднее значение μ , б) дисперсия D , в) радиус (R), г) коэффициент корреляции (r) и др.). По результатам проведённых исследований были оценены статистические характеристики множества различных снимков в различных условиях съёмки (шума и помех).

- а) *Среднее значение.*

$\mu_{cp} = \sum v_i / (N \times M)$, где v_i – яркость пикселей в пределах полигона, размер полигона изображений.

- б) *Дисперсия D .*

$$D^2 = \frac{\sum_{ij=1}^{N, M} (v_{ij}^{исх} - v_{ij}^{pec})^2}{N \times M}$$

где i, j – размеры полигона

исходного изображения.

- в) *Автокорреляционная функция.*

Наиболее полной характеристикой сигнала изображения является автокорреляционная функция, которая (в предположении эргодичности сигнала) может быть рассчитана по следующей формуле [14]:

$$A_\phi(\alpha_1, \alpha_2) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A \left\{ \iint [g(x, y) - \bar{g}] [g(x + \alpha_1, y + \alpha_2) - \bar{g}] dx dy \right\}}$$

при $A \rightarrow \infty$

где A – площадь изображения по которой производится интегрирование, $g(x, y)$ – значение яркости в точке с координатами (x, y) ,

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A \iint g(x, y) dx dy}$$

– эмпирическое математическое ожидание; α_1, α_2 – сдвиги по осям x и y соответственно между точками изображения, для которых рассчитывается корреляционная связь, \bar{g} – среднее значение яркости.

- г) *Коэффициент корреляции.*

Коэффициент корреляции между матрицами A и B одинакового размера вычисляется с помощью следующего соотношения:

$$k = \frac{\sum_c \sum_r (A(c, r) - A_m) \cdot (B(c, r) - B_m)}{\sqrt{\left(\sum_c \sum_r (A(c, r) - A_m)^2 \right) \cdot \left(\sum_c \sum_r (B(c, r) - B_m)^2 \right)}}$$

где $A_m = \text{mean2}(A)$, $B_m = \text{mean2}(B)$ – средние значения.

Блок анализа также использует понятие площади корреляции S двумерного случайного поля $g(x, y)$:

$$S = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty \varphi(x, y) dx dy}{\sigma^2},$$

где $\varphi(x, y)$ - корреляционная функция поля, σ^2 - дисперсия текущего полигона.

Однако наряду с S для более точного описания структуры поля вдоль направлений x и y применяются корреляции r_x и r_y , под которыми можно понимать радиусы корреляции одномерных сечений $g(x, 0)$ и $g(0, y)$:

$$r_x = \int \varphi(\alpha_1, 0) \frac{d\alpha_1}{\varphi(0,0)} \quad r_y = \int \varphi(0, \alpha_2) \frac{d\alpha_2}{\varphi(0,0)}$$

Здесь величина r называется радиусом корреляции изотропного поля. Необходимо также отметить, что введенные простые определения площади S и радиусов корреляции r , не универсальны.

$$C = C_v + C_D + C_R =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (v_{i+1} - v_i)^2}{\sum_{i=1}^N v_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (D_{i+1} - D_i)^2}{\sum_{i=1}^N D_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (r_{i+1} - r_i)^2}{\sum_{i=1}^N r_i^2} + \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (R_{i+1} - R_i)^2}{\sum_{i=1}^N R_i^2}$$

Их удобно применять только в случаях, когда корреляционная функция $\varphi(\alpha_1, \alpha_2)$ неотрицательна либо области её отрицательных значений незначительны [14].

Для вычисления полосы нестационарного сигнала изображений предлагается два способа:

1) на основе первой разности значений яркости исходного сигнала: а) из каждой строки i исходного изображения размером $N \times N$ пикселей вычитается ее

среднее значение; б) для каждой i строки изображения вычисляется величина полосы, т.е:

$$W_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N-1} (x(i, k+1) - x(i, k))^2}{\sum_{k=1}^N x^2(i, k)}};$$

в) полученные значения W_i усредняются для N строк исходного изображения:

$$W = \frac{\sum W_i}{N}.$$

2) на основе эквивалентной ширины спектра изображения, полученной усреднением спектра всех строк изображения по формуле:

$$W = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N/2} k^2 |\bar{X}(k)|^2}{\sum_{k=1}^{N/2} |\bar{X}(k)|^2}}$$

Все видеoinформационные, в том числе и морские, системы традиционно подразделяются на системы сбора информации и системы обработки информации, и каждая из этих разделённых частей опирается на собственные теории [17]. Это мнение при имеющейся ситуации можно считать противостоянием идей, т. е. научной проблемой, подлежащей решению.

Результаты моделирования алгоритмов вычисления меры неопределенности и полосы сигналов при решении задачи классификации нестационарных изображений и тестирования программ на языке высокого C/C++ для различных сюжетов с различными степенями неопределенности и широкополосности сигналов (более 500 кадров) позволили сделать вывод о целесообразности формирования представительной выборки (рис. 6) с целью создания универсальных алгоритмов кодирования источника, обеспечивающих максимальное приближение к важнейшим параметрам систем связи энтронпии и энтронпи-сложности.



W=8,9, M=0,98



W=12,7 M=1,5



W=24 M=1,98



Рис. 2. Компактная представительная выборка морских судов

2. Методы и алгоритмы кодирования изображений морских судов

1) Спектральный метод на основе косинусного преобразования.

При применении дискретного косинусного преобразования (ДКП) исходное изображение преобразуется в матрицу декоррелированных трансформант, а восстановление результирующего изображений без потерь можно получить путём обратного ДКП [19, 20]. Следовательно, для сжатия необходимо выполнить квантование. Квантование трансформант заключается в расширении диапазона нуля, т.е. те трансформанты, значения которых близки к нулю обнуляются и тем самым обеспечить необходимую степень сжатия. Для достижения максимальной эффективности при обработке видеoinформации была использована неравномерная шкала разбиения исходного изображения на полигоны различного размера в зависимости от корреляции яркостей соседних пикселей.

Данный способ формирования сегментов для ДКП позволяет увеличить коэффициента сжатия за счет малозначащих трансформант.

Алгоритм ДКП включает 3 этапов.

Этап 1. Предварительный анализ изображений, в результате которого формируются три группы полигонов (рис. 3):

а) группы с высокой корреляцией, или однородные (ПВК);

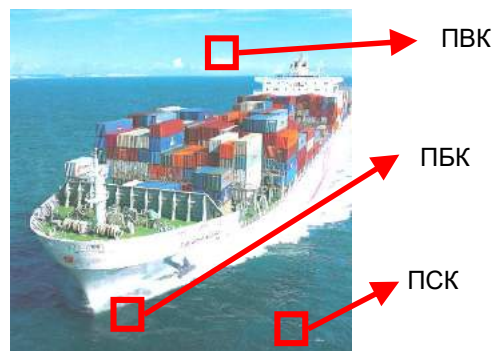


Рис. 3. Кадр грузового судна с различными

б) группы с низкой корреляцией, или квазикорреляционные (ПСК) и в) группы с отсутствием корреляции (ПБК).

При анализе движения очередной кадр записывается в буфер базового кадра (базовый кадр – это первый кадр формируемой группы), далее все последующие кадры сравниваются с базовым путем вычитания для определения остаточного кадра (остаточный кадр – это разность между текущим кадром и базовым).

Степень временной корреляции (E_t) определяется по следующей формуле:

$$E_t = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |Y_{ij} - Y'_{ij}|,$$

где Y_{ij} и Y'_{ij} – яркости базового и текущего кадров соответственно.

В зависимости от значения E_t выбирается число кадров в группе (n_t) (рис. 4):

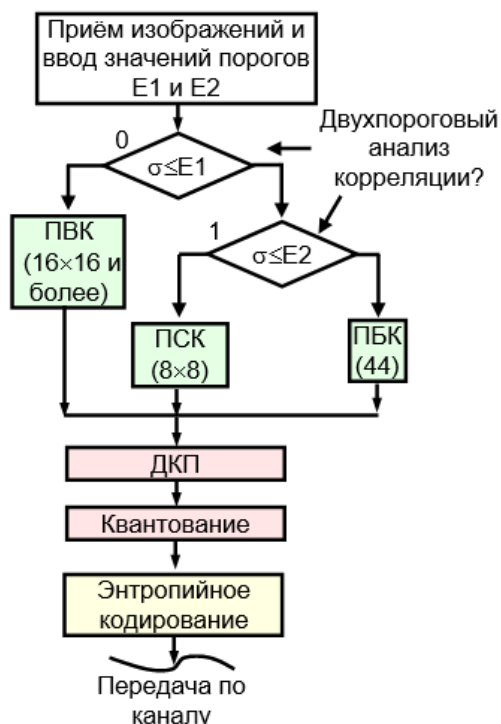


Рис. 4. Упрощенный адаптивный алгоритм формирования полигонов ДКП изображения

- если $E_t = 0$, то n_t увеличивается на единицу и данная итерация повторяется до тех пор, пока отсутствует корреляция или она очень маленькая (рис. 2). В результате формируются ПВК, которые не подвергаются ДКП и по каналу передается средняя яркость и размер полигона.

- если $E_t \leq E_{доп}$. ($E_{доп}$ – заданный низкий порог корреляции по кадру), то n_t увеличивается на единицу и данная итерация повторяется до тех пор, пока имеется слабо коррелированные пиксели. В результате формируются ПСК, которые подвергаются ДКП-3D ($n \neq 8$ и более).

- если $E_t > E_{доп}$, то n_t фиксируется, т. е. $n = 4$. В результате формируются ПБК, которые также подвергаются ДКП.

Результаты моделирования над различными изображениями показали, что можно сформулировать различные группы полигонов по параметру E_t следующим образом: $E_t \leq 4$ (ПВК); $4 \leq E_t < 24$ (ПСК); $24 \leq E_t$ (ПБК).

В зависимости от типа группы выполняется: либо ДКП-2D над полигонами 4×4 , 8×8 или 16×16 .

Следует отметить, что при определении типа группы видеоданных также выполняется анализ движения в пределах каждого видеокуба группы, и в зависимости от наличия или отсутствия движения выполняется соответствующее ДКП.

Этап 2. Адаптивное квантование и сканирование;
Этап 3. Энтропийное кодирование.

На этапе декодирования выполняются все три этапа процесса кодирования, только в обратном порядке.

2) Пространственный метод на основе рекурсивного разбиения.

Визуальные видеоданные по сравнению с другими данными являются наиболее объемными и характеризуются высокой степенью неопределенности [13], что делает их практически невозможными для задач аналитики.

Кроме того, при переходе к спектральным методам, проблема усугубляется из-за передачи некоррелированных значений – трансформант, которые не несут никакой семантики.

Следовательно, как отмечено в [13] оптимизация систем обработки и развитие методов кодирования должны опираться на минимизацию триады: битовая скорость, точность восстановления и вычислительная сложность кодеков при максимальном сохранении качества.

На основе вышесказанного сокращение избыточности должна выполняться параллельно с сохранением семантики информации. Другими словами достижение минимальной скорости передачи и потери семантики должны быть целью появления перспективных устройств обработки видеoinформации.

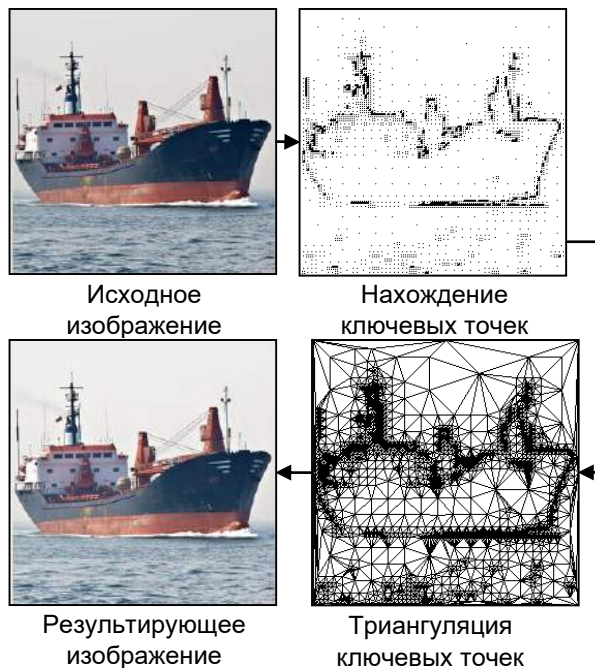


Рис. 5. Пространственно-рекурсивный метод кодирования изображений

Перспективным является разработка пространственных методов кодирования и декодирования, где формируется множество структурированных взаимосвязанных объектов изображений в виде динамических списков, содержащих всю информацию об объектах и связей между ними [12]. Одним из возможных вариантов на сегодняшний день реализации таких методов являются пирамидально-рекурсивные методы (ПРМ) обработки по ключевым точкам (КТ) изображений [9].

Исходя из вышесказанного, в ИПТ РАН им С.В. Соломенко были проведены исследования и разработана модель для решения задачи развития триангуляционных методов с использованием пирамидально-рекурсивного подхода [12] для

представления и структуризации видеоданных и организации процесса поиска КТ объектов изображений и их соединения в треугольники (рис. 5)

ПРМ включает два этапа (рис. 6):

На первом этапе выполняется поиск КОТ и представление их в виде динамического списка для передачи по каналу связи. Данный этап также, как для случая спектрального метода осуществляется путём корреляционного анализа по заданным порогам яркости.

Исходное изображение разбивается на полигоны различной формы и размера в зависимости от степени корреляции соседних пикселей и, затем находятся ключевые точки в пределах каждого полигона.

На втором этапе после приёма сжатого списка КТ осуществляется триангуляция КТ для восстановления результирующих изображений.

Однако возможности применения выше указанных методов и технологии проектирования высокопроизводительных морских видеосистем в настоящее время ограничены, во-первых, ввиду отсутствия эффективных алгоритмов видеоаналитики и, во-вторых, из-за неопределенности во времени видеосюжетов и нестационарности сигнала источника изображений.

Методы кодирования и сжатия изображений

Методика оценки эффективности алгоритмов кодирования изображений. Ниже акцент делается на проблеме неопределенности без учёта сложности алгоритма кодирования и его аппаратной реализации. Разработчики алгоритмов кодирования проверяют эффективность их работы на некоторой выборке различных сюжетов, негласно полагая, что эта выборка является представительной.

Так как речь идёт о кодировании нестационарных сигналов, то для сравнения эффективности кодирования различных алгоритмов предлагается использовать следующую методику с использованием предложенной КПВС морских судов:

1. ввод меры неопределенности видеоинформации;
2. вычисление введённой меры с использованием программных средств;
3. тестирование разработанной программы вычисления меры неопределенности на большой выборке различных по размеру и формату изображений;
4. группировка полученных значений меры по трём группам (малая ~ 1, средняя ~ 1,5 и большая ~ 2) для формирования представительной выборки;
5. выбор несколько представительных сюжетов для формирования шаблонов изображений для дальнейших исследований;
6. исследование предложенных авторами алгоритмов сжатия и восстановления сигналов изображений и получение количественных оценок результатов тестирования;
7. для каждого алгоритма и для каждого элемента выборки определение оценки значения скорости передачи информации при заданной ошибке передачи (иногда возможна инверсия – оценка ошибки передачи при заданной скорости передачи);

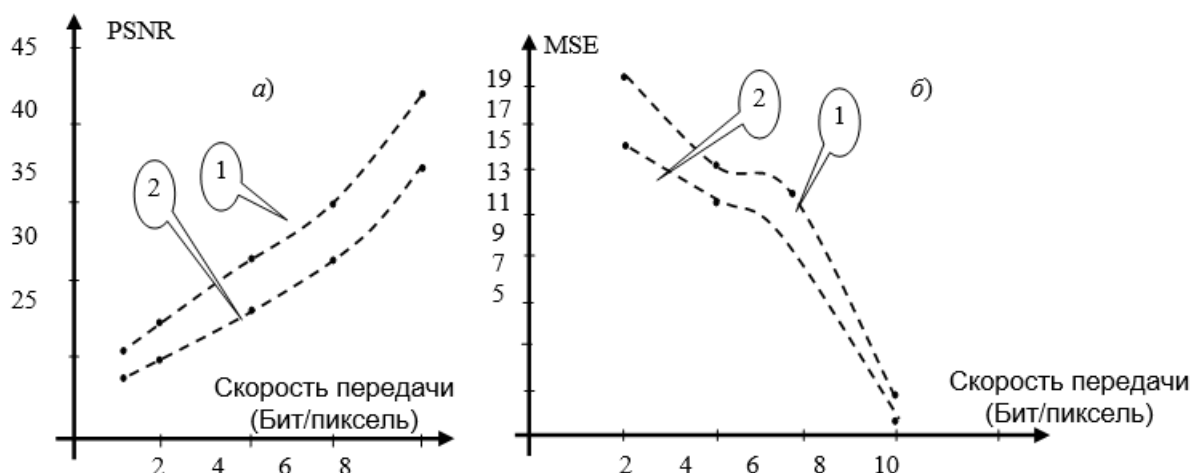
8. из-за неопределенности свойств и отсутствие информации о вероятностях появления сюжетов считать их в некоторых случаях равновероятными;
9. для оценки эффективности предложенных алгоритмов произвести усреднение по сформированной выборке значения скорости передачи при заданной ошибке (или усреднить ошибку передачи при заданной скорости передачи);
10. сравнить результаты усреднения и выбрать алгоритм, обеспечивающий наименьшую скорость передачи при заданной ошибке (наименьшую ошибку при заданной скорости передачи).



Рис. 6. Упрощенный алгоритм кодирования и декодирования по ключевым точкам

Для реализации предлагаемой методики ключевыми вопросами становятся первые два пункта методики: выбор меры нестационарности сигналов и разработка алгоритма вычисления этой меры.

Эта мера может быть применена для оценки неопределенности различного вида – например для кусочно-стационарных процессов или с монотонно изменяющимися статистиками (например, винеррвского процесса, определяемого как интеграл от белого шума, и имеющего линейно возрастающую дисперсию).



Алгоритмы передачи видеоинформации:
 1) алгоритм ДКП-3Д;
 2) Алгоритм ПРМ.

Рис. 7. Зависимость сигнал/шум (PSNR) а) и среднеквадратического отклонения (MSE) б) от скорости передачи сжатых видеоданных

Заключение

Разработана методика определения статистических характеристик сигналов изображений морских судов для оценки эффективности устройств кодирования и декодирования изображений, основана на введенном понятии меры неопределенности.

Введенная мера неопределенности может быть применена для оценки свойств сигналов изображений различных классов, например, для кусочно-стационарных или с монотонно изменяющимися статистиками при различных условиях шума и помех.

Данная методика позволяет сравнивать различные алгоритмы кодирования изображений и выбирать наилучший. Введенная мера неопределенности позволяет, наряду с мерой широкополосности, классифицировать различные изображения по этим двум характеристикам. Сформирована компактная представительная выборка сюжетов, содержащая девять изображений с различными значениями меры неопределенности и широкополосности, на основе которой может быть определена эффективность кодирования изображений различными алгоритмами.

Литература

1. Eldhuset, K. An automatic ship and ship wake detection system for space borne SAR images in coastal regions. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **1996**, 34, 1010–1019.
2. Wang, X.L.; Chen, C.X. Ship detection for complex background SAR images based on a multiscale variance weighted image entropy method. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. **2017**, 14, 184–187.
3. Wang, S.G.; Wang, M.; Yang, S.Y.; Jiao, L.C. New hierarchical saliency filtering for fast ship detection in high-resolution SAR images. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. **2017**, 55, 351–362.
4. Дюк В.А., Малыгин И.Г. Сравнение алгоритмов распознавания типов транспортных средств по параметрам их силуэтов. Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 4. № 4 (42). С. 197-201
5. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. – 832 с.
6. Dilip K. Prasad, C. Krishna Prasad, Deepu Rajan, Lily Rachmawati, Eshan Rajabally, Chai Quek. Challenges in Video Based Object Detection in Maritime Scenario Using Computer Vision//International Scholarly and Scientific Research & Innovation 11(1) 2017, Vol:11, pp. 31-36.
7. Kusuma ED, Widodo TS “FPGA implementation of pipelined 2D-DCT and quantization architecture for JPEG image compression”. Intern Symp Inform Tech (ITSim) pp 1-6,2010.
8. Фахми Ш.С. Синтез устройств пирамидально-рекурсивного кодирования изображений на сигнальных процессорах/ Ш. С.Фахми, А. И.Бобровский, Ю.М. Соколов// Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения.– 2018, вып. 1. – С. 78–89.
9. A. Tapas, “Transfer learning for image classification and plant phenotyping,” International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology (IJARCET), 2017. vol. 5, no. 11, pp. 2664–2669.
10. Ahmed K E and Farag M M 2015 Hardware/software co-design of a dynamically configurable SHA-3 System-on-Chip (SoC) Electronics, Circuits, and Systems (ICECS) p617.
11. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988.– 488 с.
12. Фахми Ш. С. Пирамидально-рекурсивный метод кодирования и декодирования видеоинформации. Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения, 2007, вып. 2, с. 43–51.

13. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио 1977г.
14. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987.
15. Фахми Ш.С. Точность, скорость и сложность устройств кодирования изображений по опорным точкам//Ш.С. Фахми, Ейд М.М. и др./ Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Том 16. № 4. С. 678–689.
16. B. Summa, J. Tierny, and V. Pascucci. Visualizing the Uncertainty of Graph-based 2D Segmentation with Min-path Stability// Eurographics Conference on Visualization (EuroVis), Volume 36 (2017), Number 3. 2017, pp. 322-344.
17. Фахми, Ш. С. Принцип доминантной информации и его приложение к видеоинформатике/ Ш. С. Фахми, А. В. Морозов и др.// Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения.– 2018, вып. 4. – С. 3–16.
18. A. Hatim, S. Belkouch “Efficient hardware architecture for direct 2D DCT computation and its FPGA Implementation”.-2013.
19. Alexander Kadyrov, Hui Yu, and Honghai Liu. Ship detection and segmentation using image correlation. In 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pages 3119–3126. IEEE, 2013.

References

1. Eldhuset, K. An automatic ship and ship wake detection system for space borne SAR images in coastal regions. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **1996**, 34, 1010–1019.
2. Wang, X.L.; Chen, C.X. Ship detection for complex background SAR images based on a multiscale variance weighted image entropy method. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. **2017**, 14, 184–187.
3. Wang, S.G.; Wang, M.; Yang, S.Y.; Jiao, L.C. New hierarchical saliency filtering for fast ship detection in high-resolution SAR images. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. **2017**, 55, 351–362.
4. Duke V. A., Malygin, I. G., Comparison of algorithms for the recognition of vehicle types in the parameters of their silhouettes. Marine intelligent technology. 2018. Vol. 4. № 4 (42). С. 197-201
5. Shannon C. E. Works on information theory and Cybernetics. M.: Foreign literature, 1963. - 832 p.
6. Dilip K. Prasad, C. Krishna Prasad, Deepu Rajan, Lily Rachmawati, Eshan Rajabally, Chai Quek. Challenges in Video Based Object Detection in Maritime Scenario Using Computer Vision//International Scholarly and Scientific Research & Innovation 11(1) 2017, Vol:11, pp. 31-36.
7. Kusuma ED, Widodo TS “FPGA implementation of pipelined 2D-DCT and quantization architecture for JPEG image compression”. Intern Symp Inform Tech (ITSim) pp 1-6,2010.
8. Fahmi Sh. S. Synthesis device of the pyramidal-recursive coding of images in signal processors/ S. Fahmy, A. I. Bobrov, Yu. M. Sokolov// Questions of radio electronics, ser. The technique of television. □ 2018, issue. 1. □ Pp. 78-89.
9. A. Tapas, “Transfer learning for image classification and plant phenotyping,” International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology (IJARCET), 2017. vol. 5, no. 11, pp. 2664–2669.
10. Ahmed K E and Farag M M 2015 Hardware/software co-design of a dynamically configurable SHA-3 System-on-Chip (SoC) Electronics, Circuits, and Systems (ICECS) p617.
11. Dagion, D., Mercero R. Digital processing of multidimensional signals. M.: Mir, 1988.- 488 p.
12. Fahmi Sh. S. Pyramidal-recursive method for encoding and decoding video information. Questions of radio electronics, ser. Television technique, 2007, issue. 2, p. 43-51.
13. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио 1977г.
14. Kolmogorov, A. N. Information theory and theory of algorithms. M.: Science, 1987.
15. Fahmi Sh. S. Precision, speed and complexity of the device coding of images using control points//S. Fahmy, Ade M. M. and others/ Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics. 2016. Volume 16. No. 4. P. 678-689.
16. B. Summa, J. Tierny, and V. Pascucci. Visualizing the Undertainty of Graph-based 2D Segmentation with Min-path Stability// Eurographics Conference on Visualization (EuroVis), Volume 36 (2017), Number 3. 2017, PP. 322-344.
17. Fahmi, Sh. the dominant information Principle and its application to videoinformation/ S. Fahmy, A. K., Cicolin, D. Y. Adamov, A. I. Bobrov, I. A. Zubakin, A. A. Kamenev, and A. V. Morozov, V. A. Rogachev, A. V. Chernogubov// Questions of radio electronics, ser. The technique of television. □ 2018, issue. 4. Pp. 3-16.
18. A. Hatim, S. Belkouch “Efficient hardware architecture for direct 2D DCT computation and its FPGA Implementation”.-2013.
19. Alexander Kadyrov, Hui Yu, and Honghai Liu. Ship detection and segmentation using image correlation. In 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pages 3119–3126. IEEE, 2013.

УДК 629.12.001.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ТОПЛИВА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ ФРЕГАТА

Игорь Васильевич Александров

аспирант кафедры компьютерной инженерии и программотехники
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 2
тел. (921) 390-02-66; e-mail: chrono555@yandex.ru

Вячеслав Анатольевич Дюк

доктор технических наук, главный научный сотрудник института проблем транспорта
им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13
тел: +7 (812) 323-29-54 e-mail: v_duke@mail.ru

Владимир Владимирович Фомин

доктор технических наук, профессор кафедры компьютерной инженерии и программотехники
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 48, корп. 2
тел. (921) 953-90-84; e-mail: v_v_fomin@mail.ru

Аннотация

В работе предлагается решение задачи классификации коэффициента расхода топлива газовой турбины фрегата с помощью WEB интеллектуальной информационной системы, на основе расширяющейся библиотеки методов машинного обучения. Рассматриваемая задача относится к задачам интеллектуального анализа данных. В качестве критериев эффективности выступают точность, полнота и время определения классов классифицируемых объектов. Приводятся технологические решения по снижению ресурсоёмкости вычислительных алгоритмов машинного обучения. Акцент делается на процедуре распараллеливания алгоритмов обучения и распознавания методов решающих функций на примере метода К ближайших соседей. С целью анализа и оценки эффективности применения метода KNN и технологии распараллеливания вычислений для решения поставленной задачи классификации был проведен ряд экспериментов в рамках настраиваемых адаптивных вычислительных систем. Представлены экспериментальные зависимости критериев эффективности решения задачи классификации коэффициента расхода топлива от конфигурации вычислительных ресурсов. Результаты демонстрируют высокий потенциал применения выбранного алгоритма и технологии распараллеливания.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные системы, распознавание образов, машинное обучение, grid системы, параллельные вычисления

THE USE OF MACHINE LEARNING METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE FUEL CONSUMPTION OF A GAS TURBINE FRIGATE

Igor V. Aleksandrov

Ph.D. student of computer engineering and software department
 Herzen State Pedagogical University of Russia
 48 Moika Emb., Bld. 20a, St. Petersburg, 191186, Russia
 e-mail: chrono555@yandex.ru tel: (921) 390-02-66

Vyacheslav A. Duke

Dr.Sci.Tech, chief researcher of the Institute of transport problems of the Russian Academy of Sciences
 12-th Line VO, 13, St.Petersburg 199178, Russian Federation
 tel: +7 (812) 323-29-54 e-mail: v_duke@mail.ru

Vladimir V. Fomin

Dr. Sci., professor, professor of computer engineering and software department
 Herzen State Pedagogical University of Russia
 48 Moika Emb., Bld. 20a, St. Petersburg, 191186, Russia
 e-mail: v_v_fomin@mail.ru

Abstract

The paper proposes a solution to the problem of classification of the fuel consumption coefficient of the frigate gas turbine using web intelligent information system, based on an expanding library of machine learning methods. This problem relates to the problems of data mining. Accuracy, completeness and time of determination of classes of the classified objects act as criteria of efficiency. Technological solutions to reduce the resource intensity of computational algorithms of machine learning are presented. The emphasis is made on the procedure of parallelization of learning algorithms and recognition of

methods of decision functions on the example of the method K nearest neighbors. In order to analyze and evaluate the effectiveness of the KNN method and the technology of parallelization of calculations to solve the problem of classification, a number of experiments were carried out in the framework of customized adaptive computing systems. Experimental dependences of criteria of efficiency of the solution of a problem of classification of fuel consumption coefficient on a configuration of computing resources are presented. The results demonstrate the high potential of the chosen algorithm and parallelization technology.

Keywords: intelligent information systems, pattern recognition, machine learning, grid systems, parallel computing

Введение

В настоящее время корабельные энергетические установки (КЭУ) оборудованы большим количеством датчиков, измеряющих различные параметры системы [1]. Но не во все комплектующие КЭУ можно встраивать датчики, поскольку это может быть довольно дорогостоящим или, в некоторых случаях, неосуществимым практическим решением. Вместо этого, для определения трудно измеряемых параметров КЭУ применяется интеллектуальный анализ данных [2], который использует методы машинного обучения [3] на большом количестве исторических данных, собранных с различных КЭУ того же типа.

Рассмотрим решение одной из таких задач с применением предлагаемых авторами алгоритмов распараллеливания методов машинного обучения и web-технологии распределённых систем – задачи по классификации коэффициента расхода топлива (КРТ) газовой турбины фрегата (Condition Based Maintenance of Naval Propulsion Plants Data Set) [4].

Газовая турбина представляет собой устройство для преобразования энергии сжатого и/или нагретого газа в механическую работу на валу, содержащее множество разнородных и технологических элементов таких как: компрессор, камера сгорания, рабочие лопатки и др. С помощью редуктора газовая турбина приводит во вращение гребной винт, что обеспечивает ход корабля. Таким образом, газовая турбина является двигателем корабля и расчет КРТ позволит рассчитать необходимое количество топлива для оптимального движения по маршруту при заданных скорости и расстоянии. Но из-за наличия сложной конструкции газовой турбины, определение КРТ является трудоемкой проблемой.

В рамках решаемой задачи КРТ является определяемым классом, который распознается по таким атрибутам как: скорость фрегата, скорость вращения газовой турбины, температура воздуха на выходе компрессора и др. В качестве критериев эффективности выступают точность, полнота и время определения классов классифицируемых объектов.

Главным недостатком многих методов машинного обучения является требование значительных вычислительных ресурсов. Стремление к повышению эффективности вычислительных алгоритмов привело к развитию

технологий распределённых систем и параллельных вычислений.

1. Описание программы и алгоритмов

В рамках исследования по повышению эффективности инструментария машинного обучения была разработана WEB интеллектуальная информационная система (ИС) [5]. Инструментарий создавался в качестве прототипа WEB-сервиса распознавания образов на основе расширяющейся библиотеки методов машинного обучения, в частности методов решающих функций [6] (K ближайших соседей (KNN), потенциальных функций, эталонов и др.).

Главным достоинством методов решающих функций является их высокая эффективность для множества задач с точки зрения достоверности результата и компактности алгоритмов анализа. А главным недостатком - требование значительных вычислительных ресурсов. Особенно это актуально при работе с большими объемами данных.

В основу архитектуры ИС заложены принципы Grid-системы [7] - распределённых вычислений и распараллеливания [8]. Grid-система строится по принципу клиент-сервер и состоит из одного или нескольких компьютеров-серверов и множества компьютеров-клиентов свободной конфигурации и представляет эффективный инструментарий для распараллеливания вычислительных ресурсов. Компоненты Web-технологий в программе реализованы с помощью сервлетов, которые расширяют функциональность Web-серверов.

Исходные параметры ИС. На вход ИС подаются два файла (выборки): 1) файл с обучающими объектами L, который содержит q объектов; 2) файл с классифицируемыми объектами X, который содержит w объектов. Каждый объект в файле представлен в виде строки атрибутов: 1) объект файла X имеет e атрибутов (столбцов); 2) объект файла L имеет e атрибутов-характеристик и один столбец идентификатора классов. Число различных классов в обучающем файле обозначается как z. На выходе получается файл с классами классифицируемых объектов (Y). Концептуально, методы решающих функций одинаковы, поэтому продемонстрируем возможности инструментария на примере метода KNN [9] на двух схемах распараллеливания вычислений: с распараллеливанием алгоритма обучения (KNN-L, рис. 1) и с распараллеливанием алгоритма распознавания (KNN-X, рис. 2).

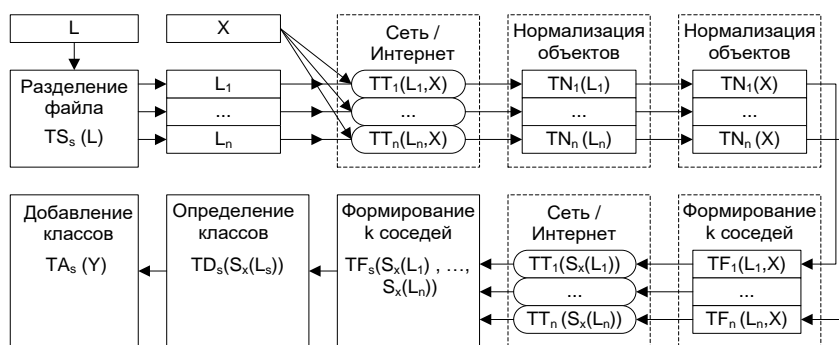


Рис. 1. Схема распараллеливания алгоритма обучения

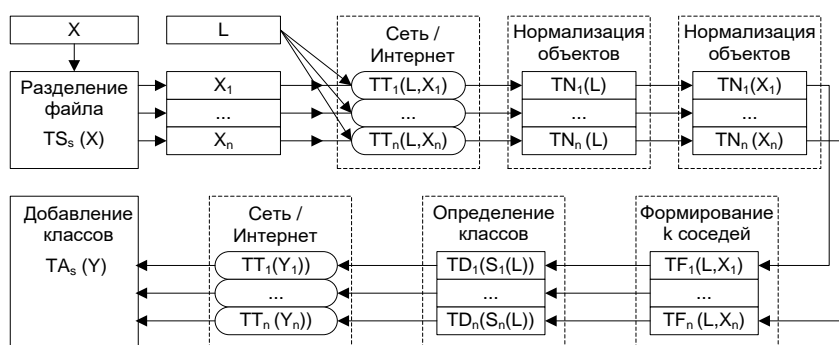


Рис. 2. Схема распараллеливания алгоритма распознавания

Процесс распознавания содержит следующие функции:

- 1) $TS_s(F)$ - сервер занимается предобработкой и распределением объектов из файла F параллельно n компьютерам согласно реализации алгоритма распараллеливания;
- 2) $TT_i(F_1, \dots, F_m)$ - передача по сети объектов из файлов F_1, \dots, F_m между сервером и i -ый компьютером;
- 3) $TN_i(F)$ - нормализация объектов из файла F на i -ом компьютере;
- 4) $TF_i(F_i, F_x)$ - определение расстояний от классифицируемых объектов из файла F_x до обучающих объектов из файла F_i и формирование $S_x(F_i)$ списков k ближайших соседей;
- 5) $TF_s(S_x(F_1), \dots, S_x(F_n))$ - сервер, после получения всех n списков k ближайших соседей $S_x(F_i)$, формирует серверный общий список k ближайших соседей $S_x(L_s)$ для классифицируемых объектов;
- 6) $TD_i(S_x(F_i))$ - по сформированным спискам k ближайших соседей $S_x(F_i)$, i -ый компьютер определяет классы Y_i для классифицируемых объектов;
- 7) $TD_s(S_x(F_i))$ - по сформированным спискам k ближайших соседей $S_x(F_i)$, сервер определяет классы Y_i для классифицируемых объектов;
- 8) $TA_s(Y)$ - сервер, после получения классов классифицируемых объектов Y , начинает процесс добавления их в общий выходной файл.

2. Описание экспериментов

Целью экспериментов является анализ и оценка эффективности применения метода KNN и

технологии распараллеливания вычислений для решения задачи классификации КРТ газовой турбины фрегата. Всего в задаче $z=26$ классов, где каждый КРТ определяется по $e=16$ атрибутам, характеризующим скорость, давление, температуру и др. параметры различных устройств КЭУ газотурбинного типа.

Исходные данные эксперимента: 1) файл L содержал $q=459$ объектов; 2) Файл X содержал $w=459$ объектов; 3) параметр метода KNN $k=19$; 4) число n клиентов менялось следующим образом: 2,3,4,5,6.

В качестве вычислительного ресурса выступает клиент-серверная система с переменным количеством клиентов (от 2 до 6) и одним сервером (B_0), которые имеют одинаковые аппаратные характеристики, что теоретически означает равную производительность. Дополнительно, на компьютере B_0 (сервере) был проведен эксперимент по получению базовой оценки времени работы метода KNN без распараллеливания.

Клиент-серверная система была реализована на основе лаборатории Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. Все оборудование сертифицировано компанией Cisco Systems, Inc. Тестируемые компьютеры имеют следующие аппаратные характеристики: процессор - Intel(R) Core (TM) i3-4130 CPU 3.40 GHz, ОЗУ - 4 Гб.

Исследуем результаты с точки зрения оценки точности распознавания (рисунок 3).



Рис. 3. Точность распознавания для различных классов при k=19

На основе результатов можно сделать следующие выводы: 1) самый высокий показатель точности определения КРТ в 100% достигается у шести классов; 2) самая низкая точность наблюдается у 7-го класса и составляет 69,57%; 3)

общая точность определения КРТ составляет 87,36%.

Проанализируем результаты с точки зрения оценки полноты распознавания (рис. 4).

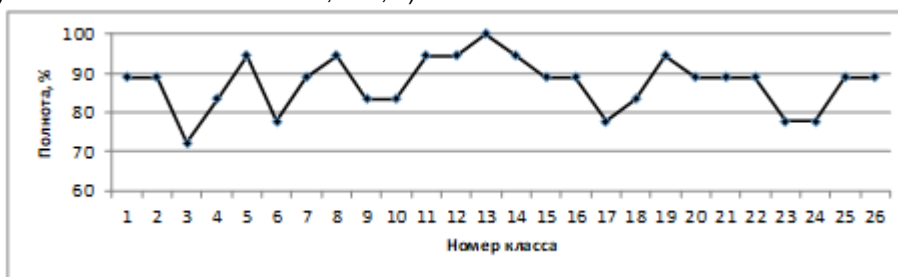


Рис. 4. Полнота распознавания для различных классов при k=19

Результаты демонстрируют следующие закономерности: 1) самый высокий показатель полноты определения КРТ в 100% наблюдается у 13-го класса; 2) самый низкий показатель полноты у 3-го класса и составляет 72,22%.

Оценим эффективность использования подключенных компьютеров. Время в таблице указано в миллисекундах (Табл. 1).

Таблица 1.

Результаты времени распознавания для различного количества компьютеров

	B ₀	Клиент-серверная система				
		n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 6
KNN-X	38674	17273	12012	8003	7204	6121
KNN-L		17628	12496	8467	7752	6694

Проанализировав результаты времени распознавания, были сделаны следующие выводы: 1) время распознавания модели KNN-X немного меньше, чем время распознавания модели KNN-L; 2) время распознавания обеих моделей обратно пропорционально количеству n клиентов в системе; 3) выигрыш времени от применения технологии распараллеливания вычислений с помощью клиент-серверной системы по сравнению с одним компьютером практически составил n раз.

Заключение

Представлены результаты задачи классификации КРТ газовой турбины фрегата двумя схемами распараллеливания метода KNN: с распараллеливанием алгоритма обучения и с распараллеливанием алгоритма распознавания. Анализ полученных результатов точности и полноты классификации позволяет говорить о применимости метода KNN для решения

поставленной задачи. Отметим, что общий показатель точности классификации КРТ - 87,36% является достаточно высоким.

Результаты применения технологии параллельных вычислений позволяют сделать вывод об эффективности использования вычислительных ресурсов для сокращения времени классификации КРТ без потери точности в зависимости от количества подключенных компьютеров.

Реализуемая архитектура инструментария имеет потенциал для решения задачи повышения эффективности вычислительных ресурсов через процедуры настройки структуры подключаемых методов и алгоритмов обработки данных и реконфигурирования подключаемых технических вычислительных средств Internet-сети.

Благодарность

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 2.2939.2017/4.6.

Литература

1. Рогов С.С., Хруцкий О.В. Алгоритм прогнозирования технического состояния узлов роторного корабельного энергетического оборудования по параметрам вибрации // Морские интеллектуальные технологии. 2016. №2(32). Т.1. С.83–88.
2. Глушков С.В., Левченко Н.Г. Аспекты применения интеллектуальных информационных технологий в управлении на морском транспорте // Морские интеллектуальные технологии. 2016. №3(33). Т.1. С.325–333.
3. Тристанов А.Б., Поляков Р.К. Использование методов машинного обучения для поиска заданного поведения временных рядов на базе символьной агрегированной аппроксимации // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т.1. С.104–109.
4. Coraddu A., Oneto L., Ghio A., Savio S., Anguita D., Figari M. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. // Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2016. №230(1). pp.136–153. (URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/condition+based+maintenance+of+naval+propulsion+plants>) (дата обращения 14.10.2018).
5. Фомин В.В., Александров И.В. Параллельные вычисления при реализации web-инструментария распознавания образов на основе методов прецедентов // Программные продукты и системы. 2017. №2. С. 207–216.
6. Сикулер Д.В., Фомин В.В. Проектные решения web-ресурса интеллектуального анализа данных и поддержки принятия решений на основе унифицированного класса методов решающих функций // СПб: РГПУ им. А.И.Герцена. 2016. 102 с.
7. Rings T., Caryer G., Gallop J., Grabowski J., Kovacicova T., Schulz S., Stokes-Rees I. Grid and Cloud Computing: Opportunities for Integration with the Next Generation Network // Journal of Grid Computing. 2009. vol. 7. no. 3. pp.375-393.
8. Алпатов А.Н. Развитие распределенных технологий и систем // Перспективы Науки и Образования. 2015. №2 (14). С. 60-66.
9. Rodrigues E.O. Combining Minkowski and Cheyshev: New distance proposal and survey of distance metrics using k-nearest neighbours classifier // Pattern Recognition Letters. 2018. vol. 110. pp.66-71.

References

1. Rogov S.S., Khrutsky O.V. The algorithm of forecasting of the technical condition of rotary nodes of ship power equipment for vibration parameters. Marine intelligent technology. №2. 2016. pp. 83-88.
2. Glushkov S.V., Levchenko N.G. The aspects of application of the intellect information technologies in marine transport management. Marine intelligent technology. №3. 2016. pp. 325-333.
3. Tristanov A., Polyakov R. Using machine learning methods to search for the given behaviour forms of time series based on symbol aggregated approximation. Marine intelligent technology. №3. 2017. pp. 104-109.
4. Coraddu A., Oneto L., Ghio A., Savio S., Anguita D., Figari M. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2016. №230(1). pp.136–153. (URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/condition+based+maintenance+of+naval+propulsion+plants>) (accessed 14.10.2018).
5. Fomin V.V., Aleksandrov I.V. Parallel'nye vychislenija pri realizacii web-instrumentarija raspoznavanija obrazov na osnove metodov precedentov (Parallel computing in implementing web-tools of pattern recognition based on case methods). Software products and systems. 2017. №2. pp. 207–216.
6. Sikuler D.V., Fomin V.V. Proektnye reshenija web-pecypca intellektual'nogo analiza dannyh i podderzhki prinjatija reshenij na osnove unificirovannogo klassa metodov reshajushih funkcij (Project solutions for web-service of data mining and decision support based on unified class for methods of solving functions). SPb, RGPU im. A.I.Gercena. 2016. 102 p.
7. Rings T., Caryer G., Gallop J., Grabowski J., Kovacicova T., Schulz S., Stokes-Rees I. Grid and Cloud Computing: Opportunities for Integration with the Next Generation Network. Journal of Grid Computing. 2009. vol. 7. no. 3. pp. 375-393.
8. Alpatov A.N. Razvitie raspredeleennyh tehnologij i sistem (Evolution of distributed technologies and systems). Perspective of Science and Education. 2015. №2 (14). pp. 60-66.
9. Rodrigues E.O. Combining Minkowski and Cheyshev: New distance proposal and survey of distance metrics using k-nearest neighbours classifier. Pattern Recognition Letters. 2018. vol. 110. pp.66-71.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГЛУБИНОЙ ПОГРУЖЕНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Андрей Григорьевич Шпекторов

Кандидат технических наук, доцент, заместитель зав. кафедрой по научной работе кафедры корабельных систем управления

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.
тел. (921) 314-96-23 e-mail: spect_ag@mail.ru

Ван Туан Фам

Аспирант, кафедра корабельных систем управления

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.
тел. (905) 235-02-99 e-mail: tuanhvhq@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается проблема управления в вертикальной плоскости малогабаритным подводным аппаратом поискового типа. Основные результаты в этой области получены для подводных аппаратов торпедообразной формы, динамика которых существенно отличается от динамики исследуемого объекта. В связи с этим возникает необходимость построения математической модели движения аппарата и выбора алгоритмов управления движением, на основе которых можно реализовать удаленное управление. В статье обоснован подход к построению математической модели подводных аппаратов малого удлинения, предложена полная модель пространственного движения, соответствующая результатам натуральных испытаний аппарата. Предложена структура нечеткого регулятора для управления глубиной погружения аппарата, а также способы его настройки. Приведены результаты моделирования управляемого движения подводного аппарата в вертикальной плоскости, показывающие эффективность функционирования нечеткого управления в сравнении с пропорционально-дифференциальным регулятором. Результаты могут быть использованы для построения систем автоматического управления пространственным движением подводного аппарата.

Ключевые слова морской подвижный объект, робототехника, подводный аппарат, математическая модель, уравнения динамики, стабилизация, нечеткий регулятор, управление глубиной, имитационное моделирование.

FUZZY CONTROL OF THE IMMERSION DEPTH OF A REMOTE-CONTROLLED VEHICLE

Andrey G. Shpektorov

Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Deputy Head of the Department for Scientific Work, Department of Ship Control Systems

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)

197376, St. Petersburg, st. Professora Popova, 5
tel. +7 (921) 314-96-23, e-mail: spect_ag@mail.ru

Van Tuan Fam

Postgraduate Student, Department of Ship Control Systems

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)

197376, St. Petersburg, Professora Popova, 5
tel. +7 (905) 235-02-99, e-mail: tuanhvhq@gmail.com

Abstract

The article deals with the problem of control in the vertical plane of a small-sized search-type underwater remote-controlled vehicle. The main results in this area were obtained for torpedo-shaped underwater vehicles, the dynamics of which differ significantly from the dynamics of the object under study. In this regard, it is necessary to build a mathematical model of the motion of a vehicle and the choice of motion control algorithms, on the basis of which remote control can be implemented. The article substantiates the approach to the construction of a mathematical model of broad in the beam remote-controlled vehicles, complete model of spatial motion has been proposed that corresponds to the results of field tests of the vehicle. A structure of a fuzzy regulator is proposed for controlling the depth of immersion of a vehicle, as well as ways to adjust it. The results of modeling the controlled motion of a remote-controlled vehicle in a vertical plane are presented, showing the effectiveness of the operation of

a fuzzy control in comparison with a proportional-differential controller. The results can be used to build systems for automatic control of the spatial motion of a remote-controlled vehicle.

Key words marine moving object, robotics, remote-controlled vehicle, mathematical model, dynamic equations, stabilization, fuzzy controller, depth control, simulation modeling.

Введение

В настоящее время подводная робототехника получила в мире широкое распространение. Усовершенствование, миниатюризация и удешевление средств управления и навигационных датчиков позволяет конструировать и изготавливать сравнительно недорогие подводные аппараты разного целевого назначения. В свою очередь, возникает задача эффективного удаленного управления подобными аппаратами.

Отечественные работы по исследованию подводных морских подвижных объектов в основном ориентированы на изучение подводных лодок либо подводных аппаратов торпедообразной формы. Характерными особенностями таких объектов является существенное удлинение (длина корпуса в несколько раз превышает его диаметр), использование рулей или элеронов для управления движением.

Аппарат, исследуемый в данной работе, разработан и изготовлен во Вьетнаме по заказу кафедры корабельных систем управления СПбГЭТУ (рис. 1). Объект относится к типу телеуправляемых подводных аппаратов поискового типа, оборудован двумя парами винтов в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. Параметры пространственного движения измеряются с помощью инерциального модуля на микромеханических элементах, а также датчика гидростатического давления. Как видно из рисунка, аппарат имеет малое удлинение.

Очевидно, динамические характеристики объекта отличаются от известных математических моделей [1], вследствие чего требуется разработка математической модели движения аппарата в диапазоне малых скоростей. Следует отметить, что низкие скорости не позволяют использовать линеаризованные модели для синтеза алгоритмов управления без соответствующего обоснования.

Таким образом, в статье рассматриваются вопросы построения математической модели и выбора алгоритма управления движением подводного аппарата.



Рис. 1. Подводный аппарат

В качестве примера рассматривается задача управления глубиной погружения аппарата. Предлагается методика синтеза регулятора глубины, основанная на теории нечеткой логики. На

основе предложенной методики можно решать задачи синтеза законов управления пространственного движения подводных аппаратов.

1. Нелинейная динамическая модель подводного аппарата

Движение подводного аппарата (ПА) в пространстве традиционно описывается шестью степенями свободы и записывается в виде системы нелинейных векторно-матричных дифференциальных уравнений [1–3]. Однако анализ литературы показывает наличие разных подходов к построению математических моделей. Различия обусловлены выбором различных систем координат и их центров, детализацией представления нелинейных динамических характеристик.

Принципиальной особенностью математических моделей подводных аппаратов является возможность или невозможность разделения на частные модели движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Это особенность часто зависит от конструкции конкретного ПА. Априорных данных о разделимости движения исследуемого объекта нет, поэтому разрабатывается полная математическая модель и исследуется влияние работы вертикальных винтов на пространственное движение аппарата.

Построение модели включает следующие этапы: выбор системы координат, расчет геометрических и инерциальных составляющих, расчет и уточнение гидродинамических характеристик. В данной работе принята связанная система координат с центром, совпадающим с центром тяжести аппарата (рис. 2).

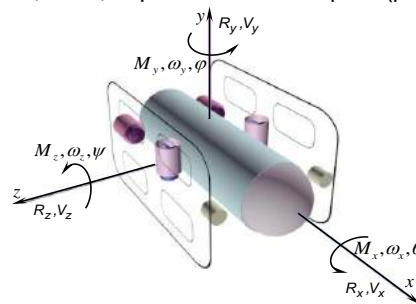


Рис. 2. Связанная система координат ПА: φ, θ, ψ – соответственно углы рыскания, крена и дифферента; $V = [V_x, V_y, V_z]^T$ – вектор линейной скорости ПА; $\Omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор угловой скорости ПА; $R = [R_x, R_y, R_z]^T$, $M = [M_x, M_y, M_z]^T$ – соответственно векторы сил и моментов, действующих на ПА

Согласно [1,2] динамика модели может быть описана системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 R_x &= m_x \dot{V}_x + m_z V_z \omega_y - m_y V_y \omega_z - \lambda_{26} \omega_z^2 + \lambda_{35} \omega_y^2 \\
 R_y &= m_y \dot{V}_y + m_x V_x \omega_z - m_z V_z \omega_x + \lambda_{26} \dot{\omega}_z - \lambda_{35} \omega_x \omega_y \\
 R_z &= m_z \dot{V}_z + m_y V_y \omega_x - m_x V_x \omega_y + \lambda_{26} \omega_x \omega_z + \lambda_{35} \dot{\omega}_y \\
 M_x &= J_x \dot{\omega}_x + (m_z - m_y) V_y V_z + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z \\
 &+ (\lambda_{26} + \lambda_{35}) (\omega_y V_y - \omega_z V_z) \\
 M_y &= J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z + (m_x - m_z) V_x V_z \\
 &- \lambda_{26} \omega_x V_y + \lambda_{35} (\dot{V}_z - \omega_y V_x) \\
 M_z &= J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y + (m_y - m_x) V_x V_y \\
 &+ \lambda_{26} (\dot{V}_y + \omega_z V_x) + \lambda_{35} \omega_x V_z
 \end{aligned}$$

(1)

где: m_x, m_y, m_z – составляющие массы с учетом присоединенных масс; J_x, J_y, J_z – моменты инерции с учетом присоединенных моментов; $\lambda_{26}, \lambda_{35}$ - присоединенные массы могут быть вычислены согласно [4,5]

Гидродинамические силы R_x^f, R_y^f, R_z^f и моменты M_x^f, M_y^f, M_z^f , обусловленные вязкостью жидкости, могут быть аппроксимированы следующими выражениями [1-3]:

$$\begin{aligned}
 R_x^f &= R_{vx} |V_x| V_x; R_y^f = R_{vy} |V_y| V_y; R_z^f = R_{vz} |V_z| V_z \\
 M_x^f &= M_{\omega x} |\omega_x| \omega_x; M_y^f = M_{\omega y} |\omega_y| \omega_y; M_z^f = M_{\omega z} |\omega_z| \omega_z
 \end{aligned}$$

где $R_{vx}, R_{vy}, R_{vz}, -$ гидродинамические коэффициенты сил; $M_{\omega x}, M_{\omega y}, M_{\omega z}, -$ гидродинамические коэффициенты моментов.

Управляющие силы R_d и моменты M_d , создаваемые винтами.

$$\begin{aligned}
 R_{dx} &= T_1 + T_2; R_{dy} = T_3 + T_4; R_{dz} = 0 \\
 M_{dx} &= 0.5(T_3 - T_4)l_2; M_{dy} = 0.5(T_1 - T_2)l_1; M_{dz} = 0
 \end{aligned}$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – силы упора винтов ПА; l_1, l_2 – расстояние между парами горизонтальных и вертикальных винтов.

Составляющие сил и моментов плавучести, входящие в обобщенный вектор сил и моментов, могут быть вычислены согласно [1-3]. Силы и моменты внешних воздействий определяются в соответствии с [3-5].

В таблице 1 приведены расчетные параметры исследуемого аппарата. Коэффициенты гидродинамических сил были подобраны в соответствии с результатами натуральных экспериментов.

Таблица 1
Динамические параметры ПА

Параметры	знания	Параметры	знания
m	9.01 (kg)	m_x	0.9 (kg)
l_1	0.3(m)	m_y	8.59 (kg)
l_2	0.3(m)	m_z	10.0 (kg)
λ_{26}	0.12(kg m)	J_x	0.03(kgm ²)
λ_{35}	0.51(kgm)	J_y	0.13(kgm ²)

A	84.26 (N)	J_z	0.13(kgm ²)
G	m*9.81 (N)		

Исследование математической модели показало сходство с результатами натуральных испытаний:

- предельная продольная скорость – 1.5 м/с
- предельная вертикальная скорость – 0.45 м/с
- угловая скорость рыскания – 24 град/с
- угловая скорость крена – 10 град/с.

2. Синтез нечеткого регулятора

Нелинейности математической модели ограничивают возможности использования классических методов синтеза регуляторов стабилизации.

Известно, что ПИД-регулятор – наиболее распространенная структура регулятора в управлении морским подводным объектом в режиме стабилизации курса и глубины. Уравнение классического ПИД-регулятора имеет вид:

$$u(t) = u_0 + K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = u_0 + u_p(t) + u_i(t) + u_d(t)$$

где K – коэффициент усиления регулятора; T_i – постоянная времени интегрирования; T_d – постоянная времени дифференцирования; u_0 – поправочное значение или смещение, настраивающее средний уровень выходного сигнала регулятора. $e(t)$ – разность между выходной величиной и опорным значением.

ПИД-регуляторы имеют ряд существенных недостатков: малая эффективность в нелинейных режимах движения; необходимость ручной настройки; низкие адаптивные способности. В связи с этим более перспективным является применение нечеткого регулятора для управления частным движением ПА.

Функциональная схема системы автоматического управления на базе нечеткой логики приведена на рисунке 3. Схема состоит из устройства сравнения, нечеткого регулятора объекта управления и цепи обратной связи [6].

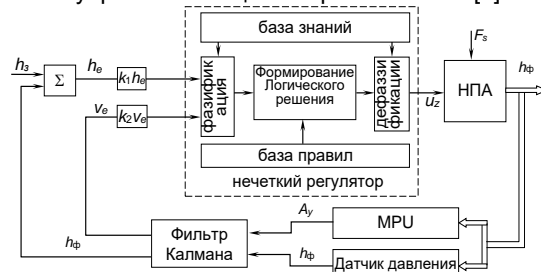


Рис. 3. Структура системы управления с нечетким регулятором

Нечеткий регулятор (fuzzy-controller) включает три основных блока – блок фазификации (fuzzification), блок формирования логического решения (inference) и блок дефазификации (defuzzification). Для управления глубиной погружения входными параметрами нечеткого регулятора являются глубина робота (h) и

вертикальная скорость, восстанавливаемая фильтром Калмана по измерениям глубины [7].

Сложность синтеза нечеткого регулятора определяется термами, качественно характеризующими входные параметры. В данной работе предложено выбрать следующие термы для глубины: отрицательная большая (NL), отрицательная малая (NS), нулевая (Z), положительная малая (PS), положительная большая (PL). Для описания вертикальной скорости достаточно трех термов: отрицательная (N) нулевая (Z) положительная (P) [8]. Функции принадлежности для термов входных параметров приведены на рис. 4.

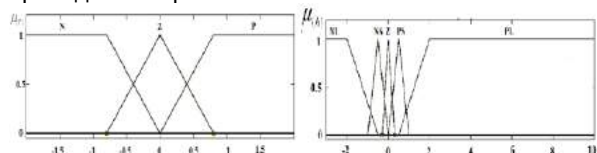


Рис. 4. Функции принадлежности термов лингвистических переменных нечеткого регулятора.

Структура термов выходного параметра, эквивалентного заданному упору винтов ПА включает следующие термы: отрицательная сильная (NL), отрицательная средняя (N), отрицательный малый (NS), нулевой (Z), положительный малый (PS), положительный средний (P), положительная сильная (PL). Количественные параметры упоров, соответствующие термам, равномерно распределяются от минимального до максимального значения.

После определения количества термов каждой лингвистической переменной и распределения функций принадлежности были синтезированы нечеткие правила. Данные правила создаются на основе опыта эксперта, который выражает на формальном языке возможные комбинации переменных управления. Для нечеткого вывода используется нечеткая модель типа Сугено, показывающая лучшие результаты в сравнении с моделью типа Мамдани [6]. Набор правил приведен в таблице 2.

Таблица 2

Правил управления

$\begin{matrix} h \\ v \end{matrix}$	NL	NS	Z	PS	PL
N	NS	Z	PS	P	PL
Z	NL	NS	Z	PS	PL
P	NL	N	NS	Z	PS

Особенностью предлагаемого нечеткого регулятора является введение дополнительных масштабирующих коэффициентов k_1 , k_2 ,

позволяющих проводить адаптацию регулятора без изменения термов и нечетких правил.

3. Результаты моделирования

Моделирование нечеткой системы управления проводилось с использованием пакета Matlab, в этом числе, специального пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox. На рисунке 5 представлен график зависимости глубины от времени при управлении ПД-регулятором и при управлении нечетким регулятором.

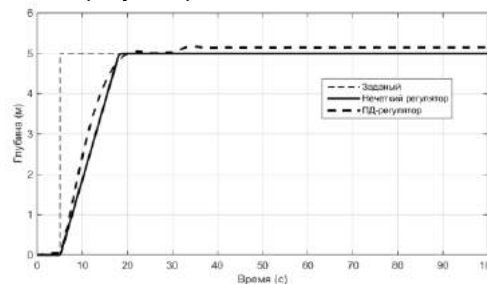


Рис. 5. График зависимости заданной и текущей глубины ПА от времени с постоянным внешним воздействием при времени 30-ой секунды;

Результаты показывают, что использование нечеткого регулятора не уступает ПД-регулятору, обеспечивает меньшее перерегулирование. Кроме того, настройка коэффициентов оптимального ПД-регулятора является трудоемкой операцией, а настройка нечеткого регулятора более проста.

Заключение

В работе рассмотрена и успешно решена задача нечеткого управления по глубине малогабаритным подводным аппаратом малого удлинения поискового типа. Для решения задачи построена математическая модель пространственного движения объекта управления, настроенная по результатам натурных испытаний аппарата, изготовленного для кафедры корабельных систем управления СПбГЭТУ.

Показано, что качество стабилизации глубины погружения нечетким регулятором не уступает классическому ПИД-регулятору. Предложена структура нечеткого управления, позволяющая осуществлять простую настройку регулятора. Алгоритмы нечеткого управления, предлагаемые в статье, были реализованы в составе программного комплекса для управления подводным аппаратом [9,10].

Применение методов нечёткой логики для синтеза законов управления современных автоматических систем контроля, может повысить надёжность функционирования подводных аппаратов и роботов.

Литература

1. Лукомский Ю. А., Корчанов В.М. Управление морскими подвижными объектами. СПб. Элмор,1996, 257с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Nakhon M. A simplified dynamic model for autonomous underwater vehicles "Materials of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Engineering" (Monterey), California, 1996, pp. 373-379.
4. Randeni P, S. A. T., Forrest A. L., Cossu R., Leong Z. Q. and Ranmuthugala D. (2015). Estimating flow velocities of the water column using the motion response of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV)// OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, Washington, DC, pp. 1-6.

5. X. Liu, Y. H. Tan, B. Di and B. M. Chen. 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). "Hydrodynamic modelling for a small-scale underwater vehicle using computational fluid dynamics", Ohrid, 2017, pp. 373-378.
6. В. Т. Фам, А. Г. Шпекторов. Конференция молодых ученых-исследователей в области электротехники и электроники (EIconRus), "Сравнительный анализ нечетких регуляторов для управления движением автономного подводного аппарата". Москва, 2018 г., с. 954-957.
7. A. G. Shpektorov and Pham Van Tuan. XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). "Comparison between methods for construction of the Kalman filter for inertial measurement module". St. Petersburg, 2017, pp. 67-69.
8. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы систем автоматического управления. – К.: "Радіоаматор", 2008. 972 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2018617697. Программа управления подводным аппаратом на основе нечеткой логики. Ван Туан Фам, А. Г. Шпекторов – 2018615376, заявлено 28.05.2018, опубл. 28.06.2018.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ 2018660003. Программа удаленного управления подводным аппаратом для операторской станции. Ван Туан Фам, А. Г. Шпекторов – 2018616622, заявлено 26.06.18, опубл. 15.08.2018.

References

1. Lukomsky Yu. A., Korchanov V.M. Upravlenie morskimi podvizhnymi ob"ectami. SPB, EIMor, 1996. 257s.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. I dr. Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy I tekhnologii., Moscow, Nauka, 2005. 398s.
3. Nakhon M. A simplified dynamic model for autonomous underwater vehicles "Materials of the IEEE Symposium on Autonomous Underwater Engineering" (Monterey), California, 1996, pp. 373-379.
4. Randeni P, S. A. T., Forrest A. L., Cossu R., Leong Z. Q. and Ranmuthugala D. (2015). Estimating flow velocities of the water column using the motion response of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV). OCEANS 2015. MTS/IEEE Washington, Washington, DC, pp. 1-6.
5. X. Liu, Y. H. Tan, B. Di and B. M. Chen. 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). "Hydrodynamic modelling for a small-scale underwater vehicle using computational fluid dynamics", Ohrid, 2017, pp. 373-378.
6. V. T. Pham, A. G. Shpektorov, Konferentsiya molodykh uchenykh-issledovatelei v oblasti electrotekhniki I avtomatiki (EIconRus). "Sravnitel'nyi analiz nechetkikh reguljatorov dlja upravlenija dvizhenien avtonomnogo podvodnogo apparata". Moscow, 2018, s. 954-957.
7. A. G. Shpektorov and Pham Van Tuan. XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). "Comparison between methods for construction of the Kalman filter for inertial measurement module". St. Petersburg, 2017, pp. 67-69.
8. Gostev V.I. Nechetkie reguljatory system avtomaticheskogo upravlenija. – Kiev, Radioamator, 2008. 972s.
9. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlja EVM RF 2018617697. Programma upravlenija podvodnym apparatom na osnove nechetkoi logiki. Van Tuan Pham, Andrei G. Shpektorov – 2018615376, zajavleno 28.05.2018, opubl. 28.06.2018.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlja EVM RF 2018660003. Programma udalennogo upravlenija podvodnym apparatom dlja operatorskoj stantsii. Van Tuan Pham, Andrei G. Shpektorov – 2018616622; zajavleno 26.06.2018, opubl. 15.08.2018

УДК 007.52:629.12

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С АКТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Игорь Иванович Туркин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: iitg@yandex.ru

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

Александр Алексеевич Воршевский

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: elemcom@smtu.ru

Игорь Михайлович Калинин

доктор технических наук, доцент,
начальник отдела перспективного развития предприятия и инновационных разработок
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44
e-mail: kaigmi@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты разработки технологии активного управления как в социальной сфере, экономике, государственном управлении, так и в технических областях. С помощью такой технологии необходимые характеристики и облик объекта удаётся сформировать или существенно изменить за счёт организации управления. Рассмотрены существующие системы активного управления сложными объектами и выявлены проблемы их совершенствования. В результате выполненного исследования предложено использовать для решения задачи концепцию адаптивного управления с искусственным интеллектом академика Российской академии наук Красовского А.А. Приведены основные принципы построения активного управления нового типа с элементами искусственного интеллекта. К новым задачам, которые могут быть решены системами активного управления при формировании характеристик объектов, следует отнести создание более экономных и надёжных сложных объектов нового поколения с расширенными возможностями.

Ключевые слова: пассивное управление, активное управление, сложный объект, характеристики, облик, управление.

BASIC PRINCIPLES OF CREATING COMPLEX TECHNICAL OBJECTS WITH ACTIVE CONTROL SYSTEMS

Igor I. Turkin

Dr. Sci. Tech., professor, professor of the department of ship automation and measurement
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: iitg@yandex.ru

Valery V. Medvedev

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor of the department of marine combustion engine and diesel plant
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: v_v_medvedev@mail.ru

Alexander A. Worshevsky

Dr. Sci. Tech., professor, professor of the department of electrical and ship engineering
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
e-mail: b_tikhomirov@mail.ru

Igor M. Kalinin

Dr. Sci. Tech., associate professor, Head of the Enterprise Development and Innovation Development Department
Krylov State Research Centre
Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation
e-mail: kaigmi@mail.ru

Abstract

The article presents the results of the development of technology of active management in the social sphere, economy, public administration, and in technical areas. With the help of this technology, the necessary characteristics and appearance of the object can be formed or substantially changed through the organization of management. Existing systems of active management of complex objects are considered and problems of their improvement are revealed. As a result of the study, it was proposed to use the concept of adaptive control with artificial intelligence of A.A. Krasovskiy, member of the Russian Academy of Sciences, for solving the problem. The basic principles of building a new type of active control with elements of artificial intelligence are given. The new tasks that can be solved by active management systems in the formation of object characteristics should include the creation of more economical and reliable new-generation complex objects with advanced capabilities.

Key words: passive control, active control, complex object, characteristics, appearance, control.

Введение

Современные технические объекты в большинстве своём являются сложными объектами, цели управления, характеристики и свойства которых изменяются при функционировании в связи с изменениями решаемых задач, режимов работы, а внешние воздействия носят непредсказуемый случайный характер. К ним в полной мере, например, относятся корабельные энергетические установки и электроэнергетические комплексы всех типов и назначения, морские подвижные объекты (подводные аппараты, водоизмещающие суда, суда на подводных крыльях и воздушной подушке, экранопланы и т.д.) как объекты управления их положением в пространстве и другие, отличающиеся наличием нестационарных и нелинейных характеристик. Для таких объектов характерны непрерывные технологические процессы большой мощности с комплексами энергетических и материальных потоков с жесткими требованиями к совокупности характеристик, вытекающими из общего целевого назначения, удовлетворить которые возможно опираясь на их автоматизацию. Важнейшими характеристиками систем автоматического управления (САУ) процессами различных объектов являются количество и качество решаемых задач. Существующие системы автоматизации технологических процессов в большинстве своём разработаны на основе методов традиционной теории управления. Эти системы хорошо себя зарекомендовали при решении свойственных им простых задач (стабилизации, слежения, программного управления на основе ПИД-законов и т.д.) и являются важными в практическом отношении. Однако такие системы управления непрерывными технологическими процессами не отвечают все возрастающим требованиям эксплуатации, прежде всего, как по количеству решаемых задач, так и возможностями автоматического и оптимального приспособления (адаптации) управлений к непредвиденным изменениям их условий эксплуатации. Это связано с тем, что процессы регулирования и регулируемые современные технические средства усложняются. Операторы сложных бортовых комплексов не сразу находят решение в нестандартных, аварийных,

катастрофических ситуациях, допускают роковые ошибки. В этих ситуациях необходима компьютерная поддержка и временная замена человеческого интеллекта искусственным. При этом требуется разработка как систем поддержки принятия решений, так и систем, функционирующих в автоматическом режиме без оператора. При автоматизации управления различными процессами должны учитываться также экономические, социальные, экологические факторы, безопасность, энергосбережение и др. Повышение опасности техногенных и природных катастроф предъявляют также к современным системам управления весьма жесткие требования. Учитывая ограниченные возможности традиционных систем автоматического управления, их влияние на формирование характеристик и облика объекта автоматизации при этом считалось незначительным. Этот подход к проектированию автоматизированных объектов носил в основном технологический, конструктивный, организационно-технический характер и не предполагал принципиального влияния управления на конечный облик объекта.

В связи с этим в последние годы перспективы значительного улучшения характеристик сложных объектов автоматизации стали связывать с более рациональным распределением различных функций между звеньями цепочки «конструкция – технология – возможности материалов – управление». При этом подходе все звенья этой цепочки взаимосвязаны, равнозначны и определяются одновременно или в процессе последовательной оптимизации. В этом случае необходимые характеристики и облик объекта удаётся сформировать или существенно изменить уже за счёт управления [1, 2, 3].

Появляется новая концепция в проектировании автоматизированных объектов, в соответствии с которой их облик существенно зависит от управления. Более того, определённые характеристики и облик сложных объектов можно формировать только путём управления, а не с помощью конструктивных и технологических методов, присущих сложившимся традиционным методам проектирования. Соответствующие перспективные методы проектирования, направленные на расширение возможностей

управления к формированию характеристик объектов, интенсивное формирование которых наблюдается в настоящее время, известны в литературе как методы активного управления техническими средствами в отличие от традиционных методов – методов пассивного управления. Сущность активного управления, следовательно, заключается прежде всего в значительном расширении задач, решаемых системой.

Первые результаты применения технологии и активного управления сложными объектами в различных областях показали, что при этом роль систем управления существенно возрастает. Наряду с этим существует ряд проблем и нерешённых задач. Развитие технических средств и методов современной теории управления, прогресс в области микропроцессорной устройств способствуют и требуют интенсивной разработке методов активного управления. В статье приводятся результаты развитию автоматизации сложных объектов на основе технологии активного управления.

1. Описание объекта исследования

Целью исследования является разработка технологии активного управления с элементами искусственного интеллекта для создания сложных объектов с новыми характеристиками и повышенной эффективностью

Для достижения поставленной цели были сформулированы **задачи**:

1. Выполнить анализ современного состояния и областей применения пассивных и активных методов активного управления сложными объектами;

2. Выявить сущность и потенциальные возможности существующих систем активного управления как в социальной сфере, экономике, государственном управлении, так и в технических областях;

3. Разработать принципы технологии активного управления объектами с элементами искусственного интеллекта для формирования характеристик и облика сложных объектов.

Научная новизна исследования.

1. Предложен и обоснован подход создания сложных объектов с новыми характеристиками и повышенной эффективностью на основе применения активного управления.

2. Разработана методика технологии активного управления с элементами искусственного интеллекта для создания сложных объектов с расширенным кругом решаемых задач и повышенной эффективностью

3. Приведены принципы создания активного управления с элементами искусственного интеллекта для создания сложных объектов.

Методы исследования. При исследовании проблемы использовались принципы системного подхода, в частности, методы исследования, основанные на использовании результатов классической и современной теории управления, методы и алгоритмы оценивания и идентификации динамических систем, методы и алгоритмы оптимального и адаптивного управления, методы имитационного моделирования [4].

По особенностям функций управления системы разделяются на активные и пассивные [5]. Общим для всех **пассивных систем** является их детерминированность, отсутствие у управляемого объекта свободы выбора своего состояния, собственных целей и средств их достижения. Пассивные системы широко применяются для управления техническими и технологическими объектами. Управление объектами с помощью технических средств без участия человека называется автоматическим управлением. **В активных системах** управляемые субъекты (хотя бы один) обладают свойством активности, свободой выбора своего состояния. Помимо возможности выбора состояния, элементы активный систем обладают собственными интересами и предпочтениями, то есть могут осуществлять выбор состояния целенаправленно. Считается, что управляемые субъекты стремятся к выбору таких состояний, которые являются наилучшими при заданных управляющих воздействиях, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от состояний управляемых субъектов. Если управляющий орган имеет модель реальной активной системы, которая адекватно описывает ее поведение, то задача управления сводится к выбору оптимального управления, максимизирующего эффективность работы системы. В своем большинстве активные системы принадлежат к областям управления человеческими коллективами. В активных системах управляемые объекты и субъекты (хотя бы один) обладают свойством активности, свободой выбора своего состояния. Помимо возможности выбора состояния, элементы активный систем обладают собственными интересами и предпочтениями, то есть могут осуществлять выбор состояния целенаправленно. Соответственно модель системы должна учитывать проявления активности управляемых субъектов. Считается, что управляемые субъекты стремятся к выбору таких состояний, которые являются наилучшими при заданных управляющих воздействиях, а управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от состояний управляемых субъектов.

2. Современное состояние активного управления

Рассмотрим примеры применения активных систем в различных областях. Активное управление находит применение как в социальной сфере, экономике, государственном управлении, так и в технических областях. В своём большинстве технологию активных систем начали разрабатывать в 70-80-х годах в социальной сфере и экономике, государственном управлении, так и в технических областях.

Научные исследования в активных организационных системах человеческой деятельности осуществлялись и осуществляются по настоящее время под руководством Российской академии наук (РАН). Объектами исследования являлись активные системы как модели организационных систем, в которых в существенной степени учитывается наличие несовпадающих интересов у субъектов управления

(агентов) и их активное поведение, то есть представление информации управляющему органу (центру) и выбор действий, исходя из собственных интересов. В 1973 г. в институте проблем управления РАН в лаборатории С.В. Емельянова был создан сектор деловых игр на основе научной группы лаборатории А.Я. Лернера. В 1974 г. сектор был преобразован в лабораторию активных систем, которую возглавил доктор технических наук Владимир Николаевич Бурков – основоположник теории активных систем. Основное научное направление лаборатории связано с развитием методов анализа и синтеза механизмов управления в активных организационных системах [6]. Важнейшим методом исследований является математическое моделирование (системный анализ, теория игр, теория принятия решений, исследование операций) процедур принятия управленческих решений. Полученные результаты используются на практике при управлении системами разного масштаба – от бригады и цеха до отрасли и региона. Лаборатория более 40 лет является организатором международных научно-практических конференций по управлению системами «Теория активных систем», «Управление большими системами». В последние годы те собственники и руководители компаний, которые находятся в постоянном профессиональном развитии в области менеджмента, столкнулись с появлением новых для России управленческих терминов – «реактивное управление», «активное управление»

и «проактивное» управление. Реактивное управление – это реакция менеджмента компании, чаще всего – очень запоздалая, на то, что уже случилось. Проактивное управление – это управление на опережение, оно сочетает в себе два подхода: прогноз + активное управление. Проактивное управление сложными объектами – проактивное (программно-целевое) управление в настоящее время является профессиональным подходом к управлению любой организацией. Оно опирается на знание основ научного управления предприятием.

Применение активного управления в системах автоматизации техническими объектами, также начиналось с 70-х годов – в авиационной, в космических аппаратах, в робототехнике и др.

В авиационной области применения технических решений, прежде всего, активного управления были и остаются основой прогресса в авиации [7]. Техника (технология) активного управления предполагает, что в процессе полета часть управляющих воздействий на самолет не зависит от действий летчика, а определяется автоматической системой управления (АСУ), обладающей значительно большими, чем летчик, быстродействием и точностью дозирования управляющих сигналов. Традиционный контур системы управления самолетом дополняется обеспечивающими технику активного управления устройствами, взаимодействие которых с традиционной системой иллюстрируется рис.1.



Рис. 1. Структурная схема системы активного управления

Летчик управляет самолетом, отклоняя рулевые поверхности с помощью гидравлических рулевых приводов. Независимо от летчика на приводы рулевых поверхностей и, соответственно, на рулевые поверхности подаются управляющие сигналы, сформированные бортовым комплексом цифровых вычислительных и аналоговых машин. Итак, техника активного управления предполагает, что в процессе полета часть управляющих воздействий на самолет не зависит от действий летчика, а определяется АСУ, обладающей значительно большими, чем летчик, быстродействием и точностью дозирования управляющих сигналов. Традиционный контур системы управления самолетом дополняется обеспечивающими технику активного управления устройствами, взаимодействие которых с традиционной системой иллюстрируется рисунком. Для того чтобы обеспечить необходимое

быстродействие АСУ (до 40-50 коррекций в секунду), приходится отказываться от традиционных проводок управления и переходить на проводные (электродистанционные или волоконно-оптические) системы, связывающие все элементы АСУ. Чтобы обеспечить надежность и безотказность таких систем на уровне традиционных механических систем, ведется трех-, четырехкратное резервирование всех элементов системы. Применение АСУ позволяет улучшить летно-технические характеристики летательных аппаратов за счёт снижения требований к жесткости конструкции (уменьшения массы летательного аппарата), увеличить критическую скорость флаттера, повысить ресурс конструкции, улучшить комфорт экипажа, пассажиров. Принципы действия АСУ и их структура выбираются исходя из решаемой задачи

Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) принято разделять на пассивные, полупассивные, полуактивные, активные и комбинированные [8]. Пассивные системы используют в качестве управляющих моментов только внешние силы. При этом бортовые источники энергии, датчики и логическая схема системы управления отсутствуют. Наибольшее применение на практике нашли пассивные системы, в основу работы которых положены следующие принципы: стабилизация вращением, гравитационная стабилизация, стабилизация с помощью сил давления солнечного излучения, аэродинамическая, магнитная стабилизация и их комбинации. В активных системах применяются датчики ориентации для всех управляемых степеней свободы. Управление производится с использованием моментов сил тяги реактивных двигателей или моментов внешних сил, а также, если это экономично, с использованием управляющих моментов, обусловленных внутренними источниками. Для повышения экономической и технической эффективности активных систем применяются различные логические устройства. К активным системам, которые обеспечивают новые возможности КА, можно отнести:

- системы трехосной стабилизации, использующие маховики или реактивные двигатели для накопления момента и магнитные или гравитационные устройства для моментной разгрузки маховиков;

- системы трехосной стабилизации с помощью реактивных двигателей; -системы трехосной стабилизации, использующие моментные гироскопы для накопления момента и реактивные двигатели или магнитные и гравитационные устройства для моментной разгрузки гироскопов.

Применение концепции активного управления в робототехнике наиболее широко представлено в работах Вукобратовича М. (Вукобратович - Миомир (р. 1930) – сербский ученый, иностранный член РАН (1991; иностранный член АН СССР с 1988). Он считается основоположником теории активного управления робототехническими системами. Основные труды по автоматике.

Исследования в области создания активных экзоскелетов начались в конце 1960-х годов практически параллельно между несколькими исследовательскими группами в США и в бывшей Югославии [9, 10]. Что такое экзоскелет? Биологи используют этот термин для обозначения внешнего скелета, которым обладают некоторые беспозвоночные и членистоногие. Он поддерживает находящееся внутри тело и защищает его от повреждений и инфекций. Так действуют, например, раковины моллюсков или хитиновый панцирь таракана. На протяжении сотен лет люди думали о том, можно ли создать нечто подобное для себя. Постепенно изобретатели пришли к мысли, что, если уж получится создать внешний «скелет» для человека, он должен не только защищать тело, но и дать ему новые возможности, сделать нас сильнее.

Существовали различия в предполагаемом использовании: усиление возможностей

трудоспособных людей, часто в военных целях, и развития вспомогательных технологий для лиц с ограниченными возможностями, и теми же проблемами, и ограничениями, тесно связанными с портативностью и взаимодействием с человеком-оператором. Экзоскелеты, увеличивающие производительность предназначены для обеспечения здоровых людей возможностью легче выполнять сложные задачи и задачи, которые в противном случае выполнить невозможно.

Важным событием в развитии активных систем явился Третий семинар ИФАК «Автоматические системы для создания инфраструктуры в развивающихся странах. В пленарном докладе Вукобратовича «Активные системы – вызов современной технике» современным пассивным системам противопоставлены активные системы. Под современной техникой автор имеет в виду пассивные системы, которые ограничены в возможности генерировать адекватные силы противодействия в реакции на локальное относительное движение. В таких системах не предусмотрены меры предотвращения возможных энергетических ослаблений и разрушений, которые в определенных случаях или под действием экстремальных условий могли бы стать катастрофическими. Активные системы обладают гидравлическими, пневматическими, электромеханическими или магнитными исполнительными устройствами; датчиками: акселерометрами, измерителями сил, потенциометрами и регуляторами обратной связи. В совокупности такие устройства позволяют сформировать команды управления на исполнительные устройства. Активные системы имеют множество преимуществ (автор в докладе их перечислил), однако имеются и очевидные недостатки: сложность, необходимость приборного состава, расходы на поддержку функционирования. В докладе рассмотрено несколько конкретных примеров активных систем и показаны преимущества, полученные при переходе от пассивных систем к активным. В частности, рассмотрены адаптивная активная система контроля шума, активное демпфирование с помощью силовой обратной связи, активная система управления вибрацией и др.

Таким образом, разработаны различные подходы и методы формирования тех или иных характеристик сложных объектов с помощью управления, которое называют активным. Эти примеры показывают широкие возможности и повышенную эффективность активного управления объектами по решению новых задач.

Однако их важная отличительная особенность заключается в том, что в них отсутствуют элементы, которые могут целенаправленно осуществлять выбор алгоритмов управления по оптимальному критерию в зависимости от изменяющихся внутренних и внешних возмущения, т.е. учитывать проявления активности управляемых субъектов.

В 1994г. академик РАН А.А. Красовский предложил концепцию самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ) с высоким уровнем искусственного интеллекта [11, 12, 13]. В большинстве работ СОРЭ

рассматривался и рассматривается в соответствии с названием, т.е. как специальный оптимальный регулятор для решения задачи адаптивного управления [14]. Однако настройка и универсальность позволяет не только использовать его для решения задачи надления объекта управления адаптивными свойствами, но и эффективно применять для целого комплекса других задач по формированию соответствующих характеристик [15, 16]. Следовательно, управление с применением СОРЭ в полной мере относится к классу активного управления и может применяться для его целей. В результате этого появляется новая технология – **активное управление сложными объектами с элементами искусственного интеллекта**.

3. Основные принципы активного управления сложными объектами с элементами искусственного интеллекта

Принципиальное и основное отличие активного управления сложными объектами с элементами искусственного интеллекта от рассмотренных выше вариантов активного управления – наличие возможности самоорганизации алгоритмов активного управления при функционировании объекта. По принципу функционирования СОРЭ относятся к системам с дискретным временем циклического типа. Все время работы СОРЭ разбито на короткие интервалы с определённой длительностью, называемые циклами. Длительность циклов зависит от ряда факторов – особенностей объекта управления, задачи управления, времени переходного процесса и др. и может быть в большом диапазоне от долей секунды и более. Обновление алгоритма и сигнала управления осуществляется для каждого цикла в соответствии с принятым функционалом оптимизации, в отличие от традиционных систем, в которых алгоритм управления не изменяется. В этом заключается сущность активного управления с самоорганизацией или элементами искусственного интеллекта. Для реализации этих возможностей при активном управлении сформированы основные принципы построения на основе методов современной теории управления:

- **организация «безмодельного» управления** при минимуме необходимой априорной информации не только о параметрах, но и о структуре математических моделей (ММ) управляемого объекта и внешних воздействий; Одним из первых этапов проектирования систем управления сложным объектом является разработка их ММ, которая требует значительных интеллектуальных и финансовых затрат. Более того, большинство существующих ММ является приближенными, или вообще отсутствуют при решении задач активного управления. В соответствии с рассматриваемым подходом не требуется знание ММ объекта в принятом виде (в виде передаточных функций, пространства состояний и т.д.), т.е. не требуется не только информация о параметрах, но и о структуре модели управляемого объекта и внешних воздействий;

- **структура системы** должна включать блоки оптимального оценивания и идентификации

(рис.2). Такие системы отличаются от традиционных, которые, как правило, содержат только измерительные устройства и блок управления;

- **формирование процесса управления** должно основываться на текущей идентификации контролируемого процесса. Текущая идентификация контролируемого процесса заключается в непрерывном определении параметров этого процесса на основе обработки его выходных и входных сигналов (величин). Существенные различия существуют между двумя фазами алгоритмического обеспечения: синтезом алгоритмов законов управления на стадии проектирования и синтезом управлений в процессе функционирования системы (совмещённый синтез). В этих системах синтез управлений должен осуществляться в процессе функционирования;

- **согласованные алгоритмы оптимальных оценивания, идентификации и управления** должны быть построены на единой платформе оптимизации по функционалу обобщённой работы;

- алгоритмы, основанные на текущей идентификации, называют универсальными, а синтез управление при этом – совмещённым.

Универсальные алгоритмы должны представлять собой комплекс взаимосвязанных алгоритмов оценивания (фильтрации), идентификации и собственно управления (регулирования). Между подсистемами оценивания (фильтрации), идентификации и собственно управления (регулирования) должно существовать тесное взаимодействие, обмен информацией для обеспечения высокой степени адаптивности комплекса;

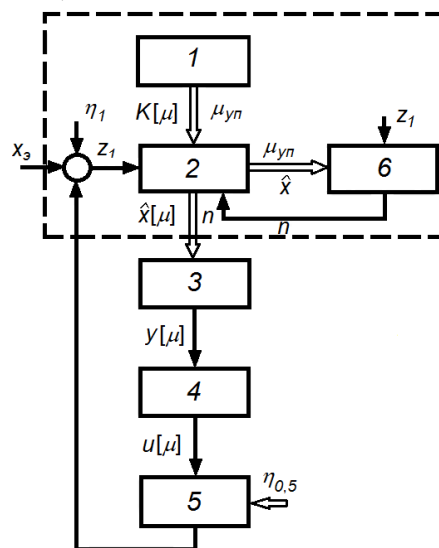


Рис.2. Блок-схема одноконтурной системы активного управления с элементами искусственного интеллекта: 1 – память (ковариационные коэффициенты, оптимальное время экстраполяции); 2 – блок оценивания и идентификации с адаптивной структурой; 3 – адаптивная исполнительная часть; 4 – экстраполятор нулевого порядка; 5 – обобщенный регулируемый объект; 6 – блок автоматического поиска порядка текущей математической модели

- **возможность реализации на базе программируемых промышленных контроллеров и компьютеров.** Разработка конкретной системы предполагает не только создание алгоритма управления (регулирования), но и её реализацию на соответствующей элементной базе. Особое внимание здесь необходимо уделять программно-аппаратной реализации, т.к. от этого зависит надежность и качество её работы.

- **принцип работы.** Непрерывное время разбивается на циклы, самым коротким интервалом времени является шаг. Входной величиной системы является сигнал рассогласования между задающим воздействием и выходной величиной регулируемого объекта. Сигнал рассогласования с помощью параллельно работающих алгоритмов оценивания на основе фильтров Калмана обрабатывается на каждом шаге. В блоке оптимальной идентификации по выбранному показателю, измеряемому и вычисляемому в ходе самого процесса регулирования, связанного с качеством, точностью регулирования на каждом цикле или на протяжении ряда циклов, осуществляется автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса. Исполнительная часть оптимального блока имеет алгоритм, синтезированный на основе интегрального квадратичного критерия. На выходе системы устанавливается экстраполятор нулевого порядка, обеспечивающий кусочно-постоянную экстраполяцию и обновление сигнала управления на каждом цикле. В течение цикла положение органа управления считается неизменным. Самоорганизация системы управления,

следовательно, осуществляется с помощью взаимосвязанных принятых алгоритмов оценки состояния системы, фильтрации входной информации, структурной и параметрической адаптации автоматически формируемой модели, и, наконец, автоматически определяемых оптимальных управляющих воздействий. Активное управление названо «с элементами искусственного интеллекта» потому, что организация его структуры и определение оптимальных параметров, необходимых для достижения цели управления, происходят самостоятельно (автоматически) в соответствии со структурой, порядком и параметрами.

Заключение

Применение технологии активного управления современными техническими объектами открывает перед проектировщиками большие возможности для успешного выполнения сложных технических заданий на их проектирование. К новым задачам, которые могут быть решены системами активного управления при формировании характеристик объектов, следует отнести создание более экономных и надёжных сложных объектов нового поколения с расширенными возможностями. Появляются и решаются важные и неизвестные ранее задачи, позволяющие, прежде всего, с помощью управления создавать сложные объекты с совершенно новыми характеристиками и обликом и значительно повышающие эффективность автоматизации.

Литература

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Новые концепции общей теории управления / Сб. науч. тр. / Под ред. А.А. Красовского. – М.-Таганрог: ТРТУ, 1995. – 183 с.
3. Красовский А.А. Научное состояние и состояние современной теории управления техническими системами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1998. – №6. – С.16-24.
4. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надёжности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
5. Активные и пассивные системы. <http://refdb.ru/look/1555854-p2.html> (13.11.2018).
6. Лаборатория №57 «Активных систем» ИПУ РАН. <https://www.ipu.ru/node/118/publications> (30.01.2019).
7. Аэродинамическая компоновка и активные системы. http://oat.mai.ru/book/glava07/7_8/7_8.html (31.01.2019).
8. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. – М.:Машиностроение, 1986. – 184 с.
9. Активная экзоскелетная система и начало развития человекоподобных роботов. Miomir Vukobratović, Director Robotics Center, Mihailo Pupin Institute 11000 Belgrade, P.O. Box 15, Serbia and Montenegro.
10. Вукобратович М. Активные системы – вызов современной технике. Третий семинар ИФАК «Автоматические системы для создания инфраструктуры в развивающихся странах (Знания и техника)» // Проблемы управления. – 2003, выпуск 3. – С.74-75.
11. Красовский А.А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №11. – С.97-112.
12. Красовский А.А., Наумов А.И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – №1. – С.69-75.
13. Красовский А.А. Избранные труды. Самые ранние. Самые новые. – М.: Наука, 2003. – 614 с.
14. Туркин И.И. Самоорганизующиеся системы управления сложными судовыми техническими средствами // Морские интеллектуальные технологии. – 2008. – №1. – С.66-68.
15. Туркин И.И. Активное управление объектами морской энергетики // Материалы межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики», СПб:СПбГМТУ, 2012. – С.37-40.
16. Туркин И.И., Мин Хеин. Интеллектуальные технологии повышения живучести судовых автоматизированных технических средств // Материалы конференции Военно-морского политехнического института ВУНЦ ВМФ: «Военно-морская академия». – 2015. – Часть III. – С.205-210.

References

1. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Krasovskogo. M. Nauka, 1987. 712 s. (In Russian)
2. Novyye kontseptsii obshchey teorii upravleniya. Sb. nauch. tr. Pod red. A.A. Krasovskogo. M.-Taganrog. TRTU, 1995. 183 s. (In Russian)
3. Krasovskiy A.A. Naukovedeniye i sostoyaniye sovremennoy teorii upravleniya tekhnicheskimi sistemami. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 1998. N6. S.16-24. (In Russian)
4. Medvedev V.V. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadozhnosti i bezopasnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. – SPb.: Strata, 2013. – 352 s. (In Russian)
5. Aktivnyye i passivnyye sistemy. <http://refdb.ru/look/1555854-p2.html> (13.11.2018). (In Russian)
6. Laboratoriya N57 «Aktivnykh sistem» IPU RAN. <https://www.ipu.ru/node/118/publications> (30.01.2019). (In Russian)
7. Aerodinamicheskaya komponovka i aktivnyye sistemy. http://oat.mai.ru/book/glava07/7_8/7_8.html (31.01.2019). (In Russian)
8. Popov V.I. Sistemy oriyentatsii i stabilizatsii kosmicheskikh apparatov. M. Mashinostroyeniyez.1986. 184 s. (In Russian)
9. Aktivnaya ekzoskeletnaya sistema i nachalo razvitiya chelovekopodobnykh robotov. Miomir Vukobratović, Director Robotics Center, Mihailo Pupin Institute 11000 Belgrade, P.O. Box 15, Serbia and Montenegro. (In Russian)
10. Vukobratovich M. Aktivnyye sistemy – vyzov sovremennoy tekhnike. Tretiy seminar IFAK “Avtomatischekiye sistemy dlya sozdaniya infrastruktury v razvivayushchikhsya stranakh (Znaniya i tekhnika)”. Problemy upravleniya. 2003. vypusk 3. S.74-75. (In Russian)
11. Krasovskiy A.A. Adaptivnyy optimal'nyy regulyator s peremennymi poryadkom nablyudatelya i vremenem ekstrapolyatsii. Avtomatika i telemekhanika. 1994. N11. S.97-112. (In Russian)
12. Krasovskiy A.A., Naumov A.I. Analiticheskaya teoriya samoorganizuyushchikhsya sistem upravleniya s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2001. N1. S.69-75. (In Russian)
13. Krasovskiy A.A. Izbrannyye trudy. Samyye ranniye. Samyye novyye. M.: Nauka. 2003. 614 s. (In Russian)
14. Turkin I.I. Samoorganizuyushchiyesya sistemy upravleniya slozhnymi sudovymi tekhnicheskimi sredstvami. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2008. N1. S.66-68. (In Russian)
15. Turkin I.I. Aktivnoye upravleniye ob'yektami morskoy energetiki. Materialy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy morskoy energetiki», SPB:SPbGMTU, 2012. S.37-40. (In Russian)
16. Turkin I.I., Min Khein. Intellektual'nyye tekhnologii povysheniya zhivuchesti sudovykh avtomatizirovannykh tekhnicheskikh sredstv. Materialy konferentsii Voenno-morskogo politekhnicheskogo instituta VUNTS VMF: «Voenno-morskaya akademiya». 2015. Chast' III. S.205-210. (In Russian)

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.612.8

**МЕТОДИКА ВЫБОРА «КОНКУРЕНТОСПОСОБНОГО НАПРАВЛЕНИЯ»
МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК****Александр Аркадьевич Исаев**

доктор экономических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41
e-mail: isaevalex@list.ru

Екатерина Сергеевна Мегей

аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Аннотация

Констатируется отсутствие среди ученых и специалистов единого методического подхода к выбору «конкурентоспособного направления» морских перевозок. При этом под «конкурентоспособным направлением» морских перевозок понимается такое направление перевозок, на котором транспортные услуги данного судоходного предприятия являются для потребителя наиболее привлекательными в сравнении с транспортными услугами судоходных предприятий-конкурентов. Одним из наиболее эффективных методических подходов к оценке конкурентоспособности транспортных услуг судоходного предприятия на данном рынке является методический подход на основе теории принятия решения о покупке, которая в свою очередь объединяет две теории: эмоциональную теорию продаж и квалиметрию. Разработанная авторами методика выбора «конкурентоспособного направления» линейных морских перевозок включает в себя шесть этапов: 1) определение основных направлений линейных морских перевозок; 2) выявление судоходных предприятий-конкурентов на каждом из основных направлений морских перевозок; 3) оценка потребительской привлекательности перевозки данного судоходного предприятия на каждом из основных направлений морских перевозок; 4) оценка потребительской привлекательности перевозки всех судоходных предприятий-конкурентов на каждом из основных направлений морских перевозок; 5) оценка конкурентоспособности перевозки данного судоходного предприятия на каждом из основных направлений морских перевозок; 6) выбор «конкурентоспособных направлений» перевозок для данного судоходного предприятия.

Ключевые слова: морские перевозки, судоходное предприятие, конкурентоспособное направление морских перевозок, методика.

SELECTION METHOD OF “COMPETITIVE DIRECTION” FOR MARITIME SHIPPING**Alexander A. Isaev**

Dr.Sci.(Economics), Professor, Department of International Marketing and Trade
Vladivostok State University of Economics and Service
690014, Vladivostok, st. Gogol, 41
e-mail: isaevalex@list.ru

Ekaterina S. Megey

graduate student, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelsky
690003, Vladivostok, st. Verkhneportovaya, 50a
e-mail: goldfish-kr@mail.ru

Abstract

It is stated that among scientists and specialists there is no uniform methodological approach to the choice of the “competitive direction” of maritime shipping. Thus, the “competitive direction” of maritime shipping is understood to be such a direction of transportation in which the transport services of the particular shipping company are most attractive to the consumer in comparison with the transport services of shipping competing companies. One of the most effective methodological approaches to assessing the competitiveness of transport services of a shipping company in a given market is a methodical approach based on the purchase decision theory, which in turn combines two theories: the emotional sales theory and qualimetry. Developed by the authors method of choosing the “competitive direction” of linear shipping includes six steps: 1) definition of the main directions of linear shipping; 2) identification of shipping companies-competitors in each of the main areas of maritime shipping; 3) an assessment of the consumer attractiveness of transportation of a given shipping company in each of the main shipping directions; 4) an assessment of the consumer attractiveness of the transportation of all shipping competing companies in each of the main shipping directions; 5) assessment of the

competitiveness of shipping of the particular shipping company in each of the main areas of maritime shipping; 6) choice of "competitive directions" of transportation for the shipping company.

Key words: shipping, shipping company, competitive shipping, method.

Введение

Сегодня среди ученых и специалистов отсутствует единое мнение по поводу содержания такого понятия как «конкурентоспособный рынок» (несмотря на то, что это понятие уже давно используется в научных и специальных источниках). При этом доминирует трактовка, согласно которой «конкурентоспособный рынок» – это «рынок, демонстрирующий рост, привлекающий к себе инвестиции, производителей из других отраслей и регионов» [5].

Однако у этой трактовки есть ряд недостатков. Прежде всего, это связано с отсутствием однозначного идентификационного признака, который позволяет отличить «конкурентоспособный рынок» от «неконкурентоспособного рынка».

По мнению авторов, до того, как предложить свою трактовку понятия «конкурентоспособный рынок», прежде всего, следует определиться с таким понятием как «конкурентоспособность рынка».

Чтобы обеспечить конкурентоспособность продукции (в частности, морских транспортных услуг), предприятие должно выбрать один из двух путей:

- 1) довести потребительские характеристики продукции до такого уровня, который позволит ей стать конкурентоспособной на данном рынке;
- 2) найти такой рынок, на котором в силу его конъюнктуры продукция предприятия будет конкурентоспособной.

В этой связи «конкурентоспособность рынка» – это способность данного рынка продемонстрировать такую конъюнктуру, при которой продукция предприятия будет наиболее привлекательной в сравнении с продукцией конкурентов. Разумеется, при одинаковых рыночных барьерах для всех участников рынка.

Таким образом, «конкурентоспособный рынок» – это рынок, на котором продукция данного предприятия является наиболее привлекательной в сравнении с продукцией конкурентов. Причем хотелось бы подчеркнуть, что понятие «конкурентоспособный рынок» является относительным: для одного предприятия данный рынок является «конкурентоспособным», для другого нет.

При этом авторы разделяют точку зрения на «конкурентоспособность продукции» как способность продукции «демонстрировать наилучшее соотношение потребительской значимости и цены» в сравнении с продукцией конкурентов [2].

Одним из наиболее специфичных рынков является рынок линейных морских перевозок. Речь идет о перевозках, объединенных одним постоянным направлением (линией) транспортировки грузов (например, Владивосток-Магадан), осуществляемой несколькими судоходными предприятиями-конкурентами.

С учетом вышеизложенного, под «конкурентоспособным направлением» морских

перевозок понимается такое направление морских перевозок, на котором транспортные услуги данного судоходного предприятия будут для потребителя наиболее привлекательными в сравнении с транспортными услугами судоходных предприятий-конкурентов.

Таким образом, чтобы обеспечить определенные экономические показатели, судоходное предприятие, прежде всего, должно заняться поиском таких направлений морских перевозок, на которых его транспортные услуги будут для потребителя более привлекательными в сравнении с транспортными услугами конкурентов.

1. Методический подход к оценке конкурентоспособности

Одним из наиболее эффективных методических подходов к оценке конкурентоспособности транспортных услуг судоходного предприятия на данном рынке является методический подход на основе теории принятия решения о покупке, которая в свою очередь объединяет две теории: эмоциональную теорию продаж [3] и квалитетрию [1].

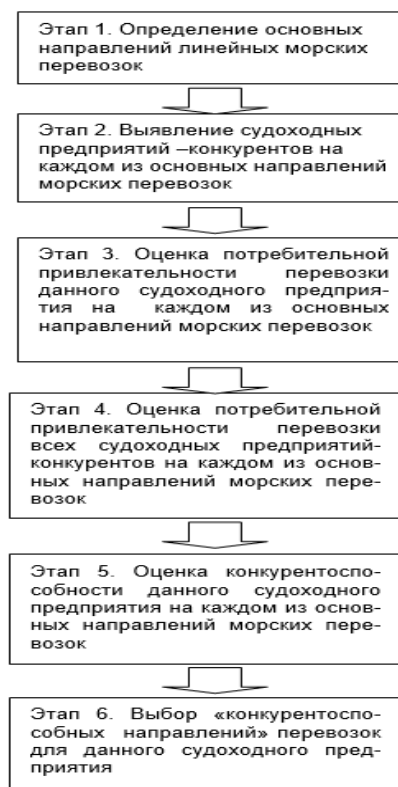


Рис. 1. Алгоритм выбора «конкурентоспособного направления» линейных морских перевозок

Согласно эмоциональной теории продаж, на выбор того или иного продукта (услуги) оказывают влияние не только характеристики так называемого «основного продукта» («основной услуги»), связанного с удовлетворением основной потребности покупателя, но и характеристики так называемых «дополнительных продуктов»

(«дополнительных услуг»), связанных с удовлетворением дополнительных потребностей покупателя.

Дело в том, что в психической системе человека основной продукт (продукт деятельности производителя, который интересует покупателя в первую очередь) ассоциативно всегда связан с дополнительными продуктами, которые нацелены на удовлетворение дополнительных (второстепенных) потребностей покупателя. То есть основной и дополнительные продукты деятельности предприятия неразрывно связаны друг с другом.

Причем на рынке нередки ситуации, когда характеристики дополнительных продуктов играют определяющую роль при выборе интегрированного продукта (речь о ситуации, когда характеристики основных продуктов предприятий-конкурентов имеют одинаковые значения).

Таким образом, говоря о приобретении той или иной транспортной услуги, по сути, речь идет о приобретении группы услуг судоходного предприятия, так называемого «интегрированного транспортного продукта» («интегрированной транспортной услуги»).

2. Алгоритм выбора «конкурентоспособного направления»

Алгоритм выбора «конкурентоспособного направления» линейных морских перевозок включает в себя шесть этапов (рис. 1).

Рассмотрим каждый из этих этапов более подробно.

Этап 1. Определение основных направлений линейных морских перевозок.

На первом этапе данное судоходное предприятие должно выявить основные направления морских перевозок, которые представляют для него интерес в первом приближении. Например, такие направления как Владивосток-Магадан, Владивосток-Холмск, Владивосток-Певек и т.д.

Этап 2. Выявление судоходных предприятий-конкурентов на каждом из основных направлений морских перевозок.

На втором этапе данное судоходное предприятие выявляет все судоходные предприятия, которые совершают морские перевозки на данном основном направлении, т.е. речь идет о выявлении предприятий-конкурентов..

Например, данным предприятием было выбрано три направления морских перевозок: Направление 1, Направление 2 и Направление 3.

В свою очередь на Направлении № 1, помимо данного предприятия, грузы перевозятся судоходными компаниями «А», «В», «С»; на направлении № 2 – судоходными компаниями «В», «D» «Е»; на направлении № 3 – судоходными компаниями «А», «С», «F».

Этап 3. Оценка потребительской привлекательности перевозки данного судоходного предприятия на каждом из основных направлений морских перевозок.

Согласно теории принятия решения о покупке, на выбор покупателем того или иного интегрированного транспортного продукта оказывают влияние потребительские

характеристики не только «основного продукта» (собственно перевозка грузов), но и «дополнительных продуктов» судоходного предприятия. В последнем случае речь идет о сопутствующих перевозке грузов дополнительных услугах (страхование груза, расчет ставок в режиме on-line, предоставление персонального менеджера и т.д.).

Оценка конкурентоспособности перевозки судоходного предприятия осуществляется в следующей последовательности.

1. Выявляются все основные потребительские характеристики интегрированного транспортного продукта (например, ранее авторами были выявлены основные характеристики каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного транспортного продукта [4]).

Говоря об оценке конкурентоспособности интегрированных транспортных услуг, следует учитывать, что особенность услуги состоит в том, что *производство и потребление* услуги протекают одновременно. В этой связи в момент принятия решения о покупке интегрированной транспортной услуги (т.е. в тот момент, когда интегрированная транспортная услуга еще не была оказана) покупатель не может оценить реальные качественные характеристики услуги в принципе.

В такой ситуации, принимая решение о выборе транспортных услуг в условиях рынка, покупатель может положиться только на *анонс* качественных характеристик приобретаемых услуг («услуги-завтра»), а также информацию о среднем качестве ранее оказанных данным судоходным предприятием транспортных услуг («услуги-вчера»).

Причем хотелось бы подчеркнуть, что с позиции эмоциональной теории продаж продукты предыдущей деятельности судоходного предприятия следует рассматривать как часть дополнительных продуктов, которые наряду с основным продуктом образуют интегрированный транспортный продукт судоходного предприятия.

2. Рассчитывается показатель потребительской значимости интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия на каждом из направлений перевозок по формуле:

$$\text{ПЗИП} = \sum K_i \times \text{ПЗ}_i, \quad (1)$$

где ПЗИП – показатель потребительской значимости данного интегрированного транспортного продукта, балл.; K_i – коэффициент значимости (весомости) данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта; ПЗ_i – показатель потребительской значимости данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта, балл. При этом $\sum K_i = 1,0$.

3. Рассчитывается показатель потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия на каждом из направлений перевозок по формуле:

$$\text{ППИП} = \text{ПЗИП} / \text{Ц}, \quad (2)$$

где ППИП – показатель потребительской привлекательности данного интегрированного транспортного продукта, балл./руб.; ПЗИП –

показатель потребительной значимости данного интегрированного транспортного продукта, балл.; Ц – цена перевозки как интегрированного продукта, руб.

Этап 4. Оценка потребительной привлекательности перевозки всех судоходных предприятий-конкурентов на каждом из основных направлений морских перевозок.

Оценка потребительной привлекательности перевозки судоходных предприятий-конкурентов осуществляется в следующей последовательности.

1. Выявляются все основные потребительские характеристики перевозки как интегрированного транспортного продукта.

2. Рассчитывается показатель потребительной значимости перевозок каждого судоходного предприятия-конкурента на каждом из направлений перевозок по формуле:

$$\text{ПЗИПК} = \sum K_i \times \text{ПЗК}_i, \quad (3)$$

где ПЗИПК – показатель потребительной значимости интегрированного транспортного продукта предприятия-конкурента, балл.; K_i – коэффициент значимости (весомости) данной потребительской характеристики интегрированного продукта; ПЗК_i – показатель потребительной значимости данной потребительской характеристики интегрированного транспортного предприятия-конкурента, балл. При этом $\sum K_i = 1,0$.

3. Рассчитывается показатель потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта каждого судоходного предприятия-конкурента на каждом из направлений перевозок по формуле:

$$\text{ППИПК} = \text{ПЗИПК} / \text{Ц}, \quad (4)$$

где ППИПК – показатель потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта предприятия-конкурента, балл./руб.; ПЗИПК – показатель потребительной значимости данного интегрированного продукта,

балл.; Ц – цена перевозки как интегрированного транспортного продукта предприятия-конкурента, руб.

Этап 5. Оценка конкурентоспособности перевозки данного судоходного предприятия на каждом из основных направлений морских перевозок.

На пятом этапе рассчитывается показатель конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия по формуле:

$$\text{КП} = \text{ППИПК} / \text{ППИПК}_{\max}, \quad (5)$$

где КП – показатель конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия; ППИПК – потребительская привлекательность интегрированного транспортного продукта данного судоходного предприятия на данном направлении перевозок, балл./руб.; ППИПК_{\max} – максимальная потребительская привлекательность интегрированного транспортного продукта судоходных предприятий-конкурентов на данном направлении перевозок, балл./руб.

Этап 6. Выбор «конкурентоспособных направлений» перевозок для данного судоходного предприятия.

На шестом этапе выбираются такие направления перевозок, на которых показатель конкурентоспособности перевозки для данного судоходного предприятия будет больше (или равен) 1,0.

Заключение

Предлагаемая методика выбора «конкурентоспособного направления» линейных морских перевозок является научно обоснованным инструментом обеспечения конкурентоспособности интегрированных транспортных услуг, а также улучшения экономических результатов данного судоходного предприятия.

Литература

1. Варжапетян А.Г. Квалиметрия. СПб: СПбГУАП, 2005. 176 с.
2. Исаев А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. 2017. Т.9, № 2. С. 83-89.
3. Исаев А.А. Продажи и эмоции. М.- Берлин: Директ-Медиа, 2017. 83 с.
4. Исаев А.А., Мегей Е.С., Лентарев А.А. Факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38), Т. 3. С. 144-150.
5. Коваленко А.И. Теоретические и методологические аспекты использования концепции «конкурентоспособности» в научных исследованиях // Современная конкуренция. 2013. № 6(42). С.65-79.

References

1. Varzhapetyan A.G. Kvalimetriya [Qualimetry]. St. Petersburg: SPSUAP, 2005. 176 p.
2. Isaev, A. A. (2017). Ocenka konkurentosposobnosti produktsii: metodologicheskij aspekt. Territorija novykh vozmozhnostej. Vestnik VVSU [Assessment of product competitiveness: methodological aspect]. Territory of new opportunities. Vestnik VVSU, Vol.9, № 2, 83-89.
3. Isaev A. A. Prodazhi i emotsii [Sales and emotions]. Moscow-Berlin, Direct-Media, 2017. 83 p.
4. Isaev, A. A., Megey, E. S., Lentarev, A.A. (2017). Faktori konkurentosposobnosti kabotajnih gruzovih morskikh perevozok [Factors of competitiveness of coastal sea freight shipping]. Marine intellectual technologies, № 4 (38), Vol.9, 144-150.
5. Kovalenko, A.I. (2013). Teoreticheskie i metodologicheskie aspekti ispolzovaniya kontseptsii 'konkurentosposobnost' v nauchnih issledovaniyah [Theoretical and methodological aspects of using the concept of "competitiveness" in scientific research]. Modern competition, No. 6 (42), 65-79.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 551.466.62

**ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ЯПОНОМОРСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦУНАМИ****Дмитрий Евгеньевич Золотухин**

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории цунами
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
693022, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1 Б
e-mail: DimZol@rambler.ru

Татьяна Николаевна Ивельская

Кандидат физ.-мат. наук, начальник центра цунами
Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
693000, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, ул. Западная, д. 78
e-mail: t_ivelskaya@sakhugms.ru

Аннотация

В данной работе рассматривается вопрос совершенствования системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. Авторами была выполнена детализация магнитудно-географического критерия цунамиопасности в Японском море для объявления тревоги цунами на Дальнем Востоке России. При этом авторами анализировалась зависимость цунамиопасности подводных землетрясений в Японском море от магнитуды и координат очага. Для выявления данной зависимости применялось численное моделирование цунами с использованием модельного очага, построенного на основе формул Окада. Была проведена серия вычислительных экспериментов, причем модельные источники цунами размещались в сейсмически активной зоне Японского моря. На основе анализа результатов вычислительных экспериментов авторами предложено выделить в Японском море район с повышенной пороговой магнитудой. Реализация данного предложения позволит поднять эффективность Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России, за счет сокращения числа ложных тревог.

Ключевые слова: Землетрясение, цунами, цунамиопасность, магнитуда, эпицентр, численное моделирование, Японское море, Дальний Восток России.

**EVALUATION OF TSUNAMI HAZARDS FROM JAPAN-MARITIME
EARTHQUAKES USING NUMERICAL MODELING OF TSUNAMI****Dmitry E. Zolotukhin**

PhD in Engineering Science (Geography), Senior Researcher of Tsunami Laboratory
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences 693022, Sakhalin
Region, Yuzhno-Sakhalinsk, ul. Nauki, 1B
e-mail: DimZol@rambler.ru

Tatyana N. Ivelskaya

PhD in Engineering Science (Physics and Mathematics), Head of the Tsunami Center
Sakhalin Hydrometeorology and Environmental Monitoring Department 693000, Sakhalin Region, Yuzhno-
Sakhalinsk, ul. Zapadnaya, 78
e-mail: t_ivelskaya@sakhugms.ru

Abstract

This paper addresses the issue of improving the tsunami warning system in the Far East of Russia. The authors carried out a detailed analysis of geographical magnitude criterion for tsunami hazard in the Sea of Japan to announce tsunami alerts in the Far East of Russia. At the same time, the authors analyzed the dependence of the tsunami hazard of underwater earthquakes in the Sea of Japan on the magnitude and coordinates of the source. To identify this relationship, numerical tsunami modeling was used with application of a model source, based on Okada's formulas. A series of computational experiments were carried out, while model tsunami sources were located in the seismically active zone of the Sea of Japan. Based on the analysis of the results of computational experiments, an area with an increased threshold magnitude was proposed by the authors to be selected in the Sea of Japan. The implementation of this proposal will increase the effectiveness of the Tsunami Warning Service in the Far East of Russia, by reducing the number of false alarms.

Keywords: Earthquake, tsunami, tsunami hazard, magnitude, epicenter, numerical modeling, Sea of Japan, Far East of Russia.

Введение

В настоящее время основным рабочим методом, применяемым Службой предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке России при принятии решения об объявлении тревоги цунами, является сейсмический. Он основан на регистрации опережающих цунами сейсмических волн. Возможность возникновения цунами в результате землетрясения оценивается по магнитудно-географическому критерию. Согласно данному критерию, землетрясение считается цунамиопасным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а интенсивность превышает заданное пороговое значение магнитуды.

Так, для землетрясений в Японском море пороговое значение магнитуды составляет 7,0. По сути, принципы функционирования СПЦ остались неизменными с момента организации службы [5, 6].

Эффективность данного магнитудно-географического критерия цунамиопасности можно оценить путем анализа исторические сведения о проявлении цунами на япономорском побережье Дальнего Востока России.

1. Исторические сведения о проявлении цунами на япономорском побережье Дальнего Востока России

Основная цунамигенная зона Дальнего Востока России, в которой расположены очаги большинства землетрясений, совпадает с западным склоном Курило-Камчатского желоба. В

окраинных морях Тихого океана, омывающих дальневосточные берега России, цунами возникают реже. Наиболее цунамиопасным является Японское море. Цунамигенная зона Японского моря проходит вдоль восточного побережья Кореи, западного побережья Японии и юго-западного побережья острова Сахалин.

Первые сведения о цунами в Татарском проливе относятся к 29.09.1878 г. Максимальная высота подъема воды оценивается в 2-5 м (источник цунами неоднозначен). В XX веке землетрясения 5.09.1971 г. и 2.08.2007 г. вызвали цунами высотой более двух метров на западном побережье Сахалина. Масштаб проявлений последнего цунами оказался значительно выше ожидавшегося от землетрясения с магнитудой 6,2 [4]. Остальные цунами, зародившиеся в Японском море (26.05.1983 г. и 12.07.1993 г.) проявились на западном берегу Сахалина слабо и имели в данном районе максимальную высоту до 26 см (Углегорск). На побережье Приморского края наблюдалось 5 цунами, особенно катастрофические последствия вызвали цунами 1.08.1940 г., 26.05.1983 г. и 12.07.1993 г. [2, 7]. Последние значительные цунами, которые наблюдались на побережье Дальнего Востока России, имели место быть в Приморском крае 12.07.1993 года и на Сахалине 2.08.2007 года. Основные данные о проявлении сильнейших цунами в Японском море, в XX-XXI веках (начиная с 1939 года) представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сильнейшие цунами в Японском море, в XX-XXI веках

N/N	Дата	Координаты очага		Глубина, очага, км	Магнитуда Ms	Заплеск, м
		широта	долгота			
1.	1.05.1939	40,10°N	139,50°E	22	7	0,3/-
2.	1.08.1940	44,47°N	139,52°E	35	7,5	5/5
3.	16.06.1964	38,43°N	139,23°E	11	7,5	5,8/0,6
4.	5.09.1971	46,57°N	141,18°E	17	6,9	2,05/2,05
5.	26.05.1983	40,47°N	139,08°E	23	7,8	14,5/5
6.	12.07.1993	42,85°N	139,20°E	16	7,6	30,6/4,43
7.	6.10.2000	35,45°N	133,13°E	10	6,8	
8.	20.03.2005	33,80°N	130,13°E	10	6,7	
9.	16.07.2007	37,57°N	138,48°E	10	6,4	
10.	25.03.2007	37,33°N	136,58°E	8	6,8	0,22/-
11.	2.08.2007	46,83°N	141,75° E	10,6	6,2	3,2/3,2

В последнем столбце в числителе – максимальный заплеск цунами, в знаменателе – максимальный заплеск на российском побережье Японского моря. Данные по цунами взяты из [2, 3, 4, 7, 9, 11].

Анализ таблицы 1 показывает, что землетрясения 1.05.1939 г. и 16.06.1964 г. с магнитудой Ms=7 и выше не вызвали опасные (с заплеском, превышающим 1 м) цунами на побережье Дальнего Востока России. В то же время, землетрясения 5.09.1971 г. и 2.08.2007 г. с магнитудой Ms<7 вызвали цунами высотой 2,05 и 3,2 м, соответственно, на западном побережье Сахалина.

Анализ географического положения очагов сильнейших исторических цунами показывает, что очаги цунами, не представляющих угрозы для Дальнего Востока России, сосредоточены западнее острова Хонсю. Очаги же опасных цунами 5.09.1971 г. и 2.08.2007 г. с магнитудой Ms<7 находятся в южной части Татарского пролива. Это говорит о том, что магнитудно-географический критерий цунамиопасности для Японского моря

нуждается в пространственной детализации, то есть пороговая магнитуда для Японского моря должна меняться в зависимости от географических координат очага землетрясения.

С целью детализации магнитудно-географического критерия цунамиопасности в Японском море, автором была проведена серия вычислительных экспериментов, давших возможность оценить зависимость максимального заплеска цунами в основных населенных пунктах япономорского побережья Дальнего Востока России от положения очага и магнитуды землетрясения. Это позволило детализировать решающее правило для объявления тревоги цунами в Приморье и на Сахалине в зависимости от магнитуды и координат очага цунамигенного землетрясения.

2. Численное моделирование япономорских цунами с использованием модели Окада

До недавнего времени очаг землетрясения рассматривался как одна или несколько площадок прямоугольной формы, вдоль которых происходит разрыв.

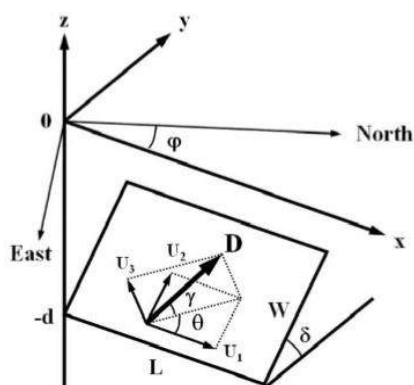


Рис. 1. Модель очага землетрясения. Рисунок заимствован из книги [8].

Из представленной на рисунке 1. модели источника землетрясения видно, что даже в упрощенном модельном случае для описания источника землетрясения требуется целый набор параметров: ширина W и длина L площадки разрыва, глубина залегания площадки d, длина вектора Бюргерса D, угол падения (Dip) δ , угол простирания (Strike) ϕ , угол между направлением простирания и направлением подвижки (Rake) θ , угол между вектором Бюргерса и плоскостью разрыва γ . Для наиболее общего случая разрыва в упругой среде в работе Ешимицу Окада [10] были собраны и систематизированы формулы для вычисления остаточных деформаций дна [1].

По просьбе автора, к. ф-м. н. Колесовым С.В. (кафедра физики моря и вод суши, МГУ им. М.В. Ломоносова) были рассчитаны модельные очаги цунами на основе данных о восьми реальных цунамигенных землетрясениях в Японском море. Данные о Невельском землетрясении 2.08.2007 г. взяты из книги [4], о других землетрясениях - из базы данных [11]. При этом, с целью выявления пороговой магнитуды, для каждого реального землетрясения было построено несколько

модельных очагов с различными магнитудами. Так как землетрясения с $M_s < 7,0$ в исследуемом районе, как правило, не представляют опасности с точки зрения проявления цунами на российском побережье Японского моря, а при $M_s > 8,0$ расчетная схема теряет устойчивость и полученные результаты менее достоверны, то в ходе вычислительных экспериментов для каждого модельного источника задавались значения магнитуд от $7,0 \leq M_s \leq 8,0$, с шагом магнитуд 0,25. Исключение составляет акватория Татарского пролива, для которой землетрясения с магнитудой $M_s = 6,2$ способны породить опасное цунами, подобное цунами 2.08.2007 г. Поэтому для модельных очагов в Татарском проливе диапазон магнитуд составлял от 6,0 до 7,7.

На основе расчетов Колесова С.В., автором было выполнено моделирование восьми цунамигенных землетрясений в данном регионе. Высоты заплесков модельных цунами рассчитывались для 28 точек побережья Дальнего Востока России (так называемых мареографных точек). Для каждого модельного источника определялась пороговая магнитуда - магнитуда в очаге цунамигенного землетрясения, при которой хотя бы в одной из мареографных точек наблюдалось интенсивное (с заплеском 1 м или более) цунами.

Модельные магнитуды, даты реальных землетрясений - «прототипов», и полученные в результате численного моделирования пороговые магнитуды представлены в таблице 2.

Модельные источники на рисунке 2 соответствуют пороговым магнитудам. Также на рисунке 2 показаны мареографные точки побережья, для которых выполнялись расчеты заплесков цунами. Большое количество мареографных точек на юго-западном берегу острова Сахалин необходима для точного определения пороговых магнитуд для очагов цунами в Татарском проливе.

Таблица 2

Землетрясения – «прототипы», параметры и результаты вычислительных экспериментов

N/N	дата	Модельные магнитуды M_s	Пороговая магнитуда M_s
1.	5.09.1971	6,2, 7,0, 7,2, 7,5, 7,7	7,5
2.	12.07.1993	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	7,5
3.	26.05.1983	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	8,0
4.	16.07.2007	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	>8,0
5.	25.03.2007	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	8,0
6.	6.10.2000	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	8,0
7.	20.03.2005	7,0, 7,2, 7,5, 7,7, 8,0	>8,0
8.	2.08.2007	6,0, 6,3, 6,5, 7,0, 7,2, 7,5, 7,7	7,0

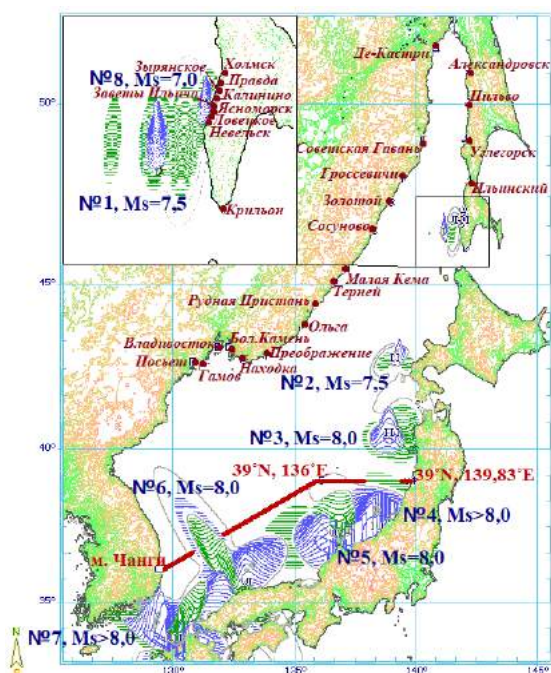


Рис. 2. Модельные очаги и результаты вычислительных экспериментов

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что пороговая магнитуда M_s для модельных источников 3 – 7 западнее острова Хонсю, а также в акватории Корейского пролива, составляет 8,0 и более. Иначе говоря, землетрясения с магнитудой менее 8,0 в юго-восточной части акватории Японского моря не порождают цунами, опасных для прибрежных населенных пунктов Дальнего Востока России. Это позволяет повысить пороговую магнитуду для объявления тревоги цунами в данном районе с 7,0 до 7,5 (с учетом недостаточной точности

моделирования). Однако, время добега волны цунами от источника 3 (север Хонсю) до густонаселенного побережья южного Приморья составляет (по данным численного моделирования) около часа. Это оставляет СПЦ минимум времени для принятия решения об объявлении тревоги цунами, а также исключает использование при принятии решения об объявлении тревоги цунами данных о высоте цунами на побережье Японии, предоставляемых Японским метеорологическим агентством.

Это заставляет сохранить для района Японского моря западнее северного Хонсю пороговую магнитуду 7,0.

Поэтому район с повышенной пороговой магнитудой целесообразно ограничить акваторией Японского моря западнее центрального и южного Хонсю (район модельных источников 4 -7). Граница района с повышенной до 7,5 пороговой магнитудой должна пройти от берега о. Хонсю севернее г. Саката ($39,00^{\circ}N, 139,83^{\circ}E$) к точке с координатами ($39,00^{\circ}N, 136,00^{\circ}E$), а от нее – к мысу Чанги (Changgi; $36,08^{\circ}N, 129,57^{\circ}E$) (рис. 2). Правильность этого предложения подтверждает событие 16.06.1964 г. с координатами ($38,43^{\circ}N, 139,23^{\circ}E$), при магнитуде 7,5 не нанесшее ущерба Приморью.

Заключение

На основании анализа результатов серии вычислительных экспериментов авторами предлагается выделить в Японском море район с повышенной до 7,5 пороговой магнитудой, граница которого пройдет от берега о. Хонсю севернее г. Саката ($39,00^{\circ}N, 139,83^{\circ}E$) к точке с координатами ($39,00^{\circ}N, 136,00^{\circ}E$), а от нее – к мысу Чанги (Changgi; $36,08^{\circ}N, 129,57^{\circ}E$) (рис. 2). Реализация данного предложения позволит поднять эффективность СПЦ, за счет сокращения числа ложных тревог.

Дополнительная информация

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМГиГ ДВО РАН. Автор выражает благодарность к. ф-м. н. Колесову С. В., научному сотруднику кафедры физики моря и вод суши МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

1. Большакова А.В. Связь параметров очага цунами с характеристиками землетрясения: дис. ... канд. физ-мат. наук. М.: МГУ имени Ломоносова, 2013. 180 с.
2. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск Камчатский: Камшат, 1998. 88 с.
3. Лаборатория цунами, Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН. Режим доступа: http://tsun.sccc.ru/tsulab/tsun_hp_r.htm (дата обращения 2.04.2018).
4. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин. / под ред. Леви-на Б. В. и Тихонова И. Н. М.: Янус-К, 2009. 204 с.
5. Поплавский А. А., Храмушин В. Н., Непоп К. И., Королев Ю. П. Оперативный про-гноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. / под ред. Иващенко А. И. Южно-Сахалинск, 1997. 273 с.
6. Поплавский А. А., Храмушин В. Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. Владивосток: Дальнаука, 2008. 176 с.
7. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
8. Levin B.W., Nosov, M.A. Physics of Tsunamis // Springer, 2008.
9. National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. DOI: 10.7289/V5PN93H7. Available at: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml, accessed 2.04.2018.
10. Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. Vol. 75(4), P. 1135–1154.
11. The USGS Earthquake Hazards Program. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/>, accessed 2.04.2018.11

References

1. Bol'shakova A.V. Svyaz' parametrov ochaga tsunami s kharakteristikami zemletryaseniya (Communication of parameters of the center of a tsunami with characteristics of an earthquake): dis. ... kand. fiz-mat. nauk. M.: MGU imeni Lomonosova, 2013. 180 p.
2. Zayakin YU.A. Tsunami na Dal'nem Vostoke Rossii (Tsunami in the Far East of Russia). Petropavlovsk Kamchatskiy: Kamshat, 1998. 88 p.
3. Laboratoriya tsunami, Institut Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Geofiziki SO RAN. (Laboratory of a tsunami, Institute of Calculus Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science). Access mode: http://tsun.sssc.ru/tsulab/tsun_hp_r.htm (date of the application 2.04.2018).
4. Nevel'skoye zemletryaseniye i tsunami 2 avgusta 2007 goda, o. Sakhalin (Nevelsky earthquake and tsunami on August 2, 2007, Sakhalin Island) / pod red. Levina B. V. i Tikhonova I. N. M.: YAnus-K, 2009. 204 p.
5. Poplavskiy A. A., Khramushin V. N. Nepop K. I., Korolev Yu. P. Operativnyy prognoz tsunami na morskikh beregakh Dal'nego Vostoka Rossii (Operational forecast a tsunami on the coast of the Far East Russia). Yuzhno-Sakhalinsk, 1997. 273 p.
6. Poplavskiy A. A., Khramushin V. N. Metody operativnogo prognoza tsunami i shtormovykh navod-neniy (Methods of operational forecasting tsunamis and storm floods) / pod red. Ivashchenko A. I. - Vladivostok: Dal'nauka, 2008. 176 p.
7. Solov'yev S.L., Go CH.N. Katalog tsunami na zapadnom poberezh'ye Tikhogo okeana (Catalog of a tsunami on the western coast of the Pacific Ocean). M.: Nauka, 1974. 310 p.
8. Levin B.W., Nosov, M.A. Physics of Tsunamis. Springer, 2008.
9. National Geophysical Data Center / World Data Service (NGDC/WDS): Global Historical Tsunami Database. National Geophysical Data Center, NOAA. DOI: 10.7289/V5PN93H7. Available at: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml, accessed 2.04.2018.
10. Okada, Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. Vol. 75(4), P. 1135–1154.
11. The USGS Earthquake Hazards Program. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/>, accessed 2.04.2018.11



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное ([ISSN № 2073-7173](#)) издание
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. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
6. 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).

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 выставляемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"
д.т.н. проф. Никитин Н.В.**

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ**Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**