

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101

ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

0010100101100110011001100111011001110001001100100100100100100100100100100100100100100100100

001101010011010010000101101001010100010010001111100110011001101101011001110000001110010100101

11011100110010101111001010100100011010011100010100100110010101111001010111001010101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

00101001110011010011110001010010101011010100100001011000110011001010110001011001101001010010



№ 1 (47) Т.2 2020
1 PART 2 2020



ТОВВМУ им. С.О. Макарова

**ТРУДЫ
МОРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени адмирала Г.И. Невельского,
ТИХООКЕАНСКОГО ВЫСШЕГО ВОЕННО-МОРСКОГО УЧИЛИЩА
имени С.О. Макарова**



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 2 2020 Сквозной номер 47

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук и в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов». Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте www.morintex.ru в открытом доступе. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

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

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

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

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

Тел./факс +7 (812) 513-04-51, e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов, В.А. Пятакович

Верстка: А.И. Соломонова



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 2 2020 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov, V.A. Pyatakovich

Page-proofs: A.I. Solomonova



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 том 2 2020 (Сквозной номер 47)

www.morintex.ru

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 part 2 2020 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

P. A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



К 80-ЛЕТИЮ ЗУЕВА ВАЛЕРИЯ АНДРЕЕВИЧА



Зуев Валерий Андреевич, 1940 года рождения, в 1965 году окончил с отличием кораблестроительный факультет Горьковского политехнического института и был оставлен на факультете для учебы в аспирантуре. В 1970 г. он защитил кандидатскую диссертацию. С 1969 г. по 1972 г. работал в Комсомольском-на-Амуре политехническом институте, пройдя путь от ассистента, доцента до заведующего кафедрой высшей математики.

С 1972 г. В.А. Зуев на педагогической работе в Горьковском политехническом институте. В 1981 г. он избирается на должность заведующего кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» и в этой должности работает до сих пор. В 1991 г. В.А. Зуеву присвоено звание профессора, в 1996г. он защитил докторскую диссертацию.

Кафедра «Кораблестроение и авиационная техника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, которую возглавляет проф. В.А. Зуев, сыграла решающую роль в подготовке инженеров-кораблестроителей для судостроительных организаций и предприятий Нижнего Новгорода как гражданского, так и военного профиля. В.А. Зуев является одним из разработчиков современной концепции многоуровневой подготовки специалистов по направлению «Кораблестроение и океанотехника». В.А. Зуев подготовил 17 кандидатов наук, из которых 2 стали докторами наук.

Общий стаж работы - 57 лет в отрасли - 55 лет в данном коллективе - 48 лет Профессор В.А. Зуев известный у нас в стране и за рубежом специалист в области ледотехники, основатель и руководитель нижегородской научной школы по энергосберегающим технологиям и средствам разрушения ледяного покрова и связанных с этим фундаментальных и прикладных исследований взаимодействия со льдом надводных и подводных объектов. Под его руководством разработана уникальная техническая система – промышленный образец ледокольной платформы на воздушной подушке не имеющий аналогов в России. Руководит опытно-конструкторским бюро «Лед».

В.А. Зуев – автор более 250 научных и научно-методических работ, в том числе 6 научных монографий и 14 учебных пособий. Ему принадлежат 20 авторских свидетельств и патентов.

Сердечно поздравляем Вас, уважаемый Валерий Андреевич, с юбилеем и желаем Вам доброго здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной научной деятельности на благо Отечества!

СОДЕРЖАНИЕ	стр
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Мамонтов А.И., Китаев М.В., Суров О.Э., Новиков В.В. Изучение взаимосвязи главных напряжений при разрушении морского льда.....	11
Москаленко М.А., Маликова Т.Е., Затепякин С.М., Друзь И.Б. Проблемы обеспечения несмещаемости груза при перевозках зерна навалом на универсальных судах.....	18
Москаленко М.А., Друзь И.Б., Москаленко В.М., Затепякин С.М. Особенности обеспечения конструктивной безопасности морских судов при действии нагрузок от ударов волн.....	23
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Казанов Г.Т., Нагаева М.В. Расчеты усталостной прочности судовых корпусных конструкций.....	27
Азовцев А.И., Огай С.А., Войлошников М.В., Петров В.А., Москаленко О.В. Амфибийные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для освоения арктических шельфовых побережий.....	32
Огай С.А., Войлошников М.В. Принципы оценки верфи серийного модульного судостроения в системе отраслевых связей на Дальнем Востоке.....	45
Карпачёв А.А. Метод точного расчёта длины цилиндрической оболочки.....	57
Каленчук С.В., Китаев М.В., Суров О.Э., Мамонтов А.И. Сравнение требований российского морского регистра судоходства и финско-шведских правил к ледовым классам.....	63
Кулеш В.А., Азовцев А.И. Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт)	69
Кулеш В.А., Пец Н.Г. Эффективность наружных ледовых усилений с наклоном полос.....	77
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Илларионов Г.Ю., Шмаков А.С., Лаптев К.З., Дмитриев С.С. Эволюция корабельного состава флота: от судов комплексного снабжения и управления - к плавучей базе морских робототехнических комплексов.....	83
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценка спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля.....	91
Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Экспериментальное исследование отрывных течений потока в криволинейных каналах постоянного сечения.....	95
Симашов Р.Р., Чехранов С.В., Ханькович И.Н. Определение расходных характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин.....	100
Кича Г.П., Семенюк Л.А., Тарасов М.И. Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием.....	105
Самсонов А.И., Соболенко А.Н., Стенд для измерения крутящего момента маломощных энергоагрегатов.....	113
Тарасов В.В., Соболенко А.Н., Тарасов М.И. Эффективность применения регенерированного моторного масла легированного присадками в судовых дизелях разной форсировки.....	116
Кича Г.П., Надежкин А.В., Бойко С.П. Расчет параметров регенерации самоочищающихся фильтров смазочных систем судовых дизелей.....	123
Голенищев А.В., Надежкин А.В., Старченко М.Е. Методика для трибодиагностики судовых крейцкопфных дизелей на основе имитационного моделирования.....	131
Гомзяков М.В., Друзь И.Б. Определение весовых коэффициентов по факторам влияния эргатического элемента судна на морскую аварийность в Дальневосточном регионе.....	136

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Орошук И.М., Гуреев И.Е., Сучков А.Н., Соловьев М.В. Результаты исследования пространственно-корреляционных характеристик однолучевого ионосферного декаметрового канала связи..... 145

Сучков А.Н., Орошук И.М., Соловьев М.В., Мельник С.Л. Метод компенсации пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех в цифровых антенных решетках с нелинейным методом обработки сигналов..... 151

Орошук И.М., Соловьев М.В., Сучков А.Н., Гаврилов А.А. Способ компенсации интерференционного поля станционных радиопомех в коротковолновых широкополосных каналах радиосвязи..... 157

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Пятакович В.А., Рычкова В.Ф., Филиппов Е.Г. Нейронные сети как вариант вычислительной структуры системы классификации морских целей..... 163

Пятакович В.А., Рычкова В.Ф., Филиппова А.В., Пятакович Н.В. Расчет эффективности классификации целей интеллектуальной системой ВМФ, использующей комплекс вычислительных операций нейронных сетей..... 175

Пятакович В.А., Суров А.Б., Рычкова В.Ф. Оптимальные и адаптивные методы классификации гидроакустических сигналов для морских интеллектуальных систем..... 186

Пятакович В.А., Пурденко А.П., Рычкова В.Ф., Филиппов Е.Г. Адаптивная локально-оптимальная стратегия управления эксплуатацией нейросетевой системы классификации морских целей..... 195

Завьялов В.В., Агапов В.А. Метод повышения точности корреляционного лага на основе предварительной фильтрации сигналов на входе схемы слежения..... 205

Стародубцев П.А., Сторожок Е.А. Идентификация источника сигнала в измерительном узле системы морского экологического и гидроакустического мониторинга..... 212

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Викторов Р.В., Липовецкий А.О. Результаты экспериментальных исследований по обнаружению пловцов при развитой структуре интерференционного гидроакустического поля в прибрежной акватории берегового клина..... 215

Викторов Р.В., Дягилев М.В., Крупеньков А.В. Экспериментальные исследования возможности регистрации шумоизлучения морского объекта в неблагоприятных гидрологических условиях при использовании адаптивной фильтрации помех..... 223

Глушков С.В., Соболевская Е.Ю., Левченко Н.Г. Формирование обучающей выборки для информационной интеллектуальной системы организации и управления арктическими морскими грузоперевозками..... 230

Гомзяков М.В., Соболенко А.Н. Цифровизация морского надзора в Дальневосточном регионе..... 236

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Луговец А.А., Сироткин А.Д., Терентьева Л.В., Фунтусов А.А. Определение оптимального числа причалов в порту..... 244

Фисенко А.И., Салтыков М.А. Рыбопромышленный кластер: коэффициентный методический подход к оценке потенциала и возможности формирования на Дальнем Востоке России..... 249

Лазарев В.А., Фисенко А.И. Транзитный потенциал Северного морского пути..... 257

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Девятисильный А.С., Гриняк В.М., Шурыгин А.В., Иваненко Ю.С. Выставка многопозиционной маячной системы на основе траекторных измерений (на английском языке)..... 262

CONTENTS

page

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

Oleg E. Surov, Maksim V. Kitaev, Andrey I. Mamontov, Valery V. Novikov Study of the Principal Stresses Relation on Sea Ice Crush.....	11
Mikhail A. Moskalenko, Tatyana E. Malikova, Sergey M. Zatepyakin, Ivan B. Druz Problems of ensuring non displacement cargo during transportation of grain in bulk on universal vessel.....	18
Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz, Vladislav M. Moskalenko, Sergey M. Zatepyakin Features ensure structural safety ships under the action of loads from shock waves.....	23

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

Gennady T. Kazanov, Marina V. Nagaeva Calculations of fatigue strength of ship hull structures.....	27
Anatoliy I. Azovtsev, Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov, Vladimir A. Petrov, Oleg V. Moskalenko Amphibious all-terrain vehicles with the air-cushion caterpillars for the operation on the Arctic waterfronts.....	32
Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov The concepts of the evaluation of batch modular shipbuilding yard in the system of the industrial networks characteristic in the Far East coast of Russia.....	45
Aleksandr A. Karpachev Method of exact calculation of length of cylindrical shell.....	57
Sergey V. Kalenchuk, Oleg E. Surov, Maksim V. Kitaev, Andrey I. Mamontov Comparison of the requirements of russian maritime register of shipping and finnish-swedish rules for ice classes.....	63
Victor A. Kulesh, Anatoly I. Azovtsev Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground).....	69
Victor A. Kulesh, Nikolay G. Pets Efficiency of slanted external ice hull reinforcement.....	77

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Gennady Y. Illarionov, Andrew S. Shmakov, Constantin Z. Laptev, Sergei S. Dmitriev The evolution of the fleet: from the complex supply and control ships to marine robotic systems base.....	83
---	----

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber.....	91
Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Experimental research of the separate flows in curved line channels of constant section.....	95
Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov, Ilya N. Khankovich Determination of mass flow characteristics of supersonic rectangular nozzle diaphragms in modeling variable duties of low-consumption turbines.....	100
Gennadiy P. Kicha, Liudmila A. Semeniuk, Maxim I. Tarasov Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk.....	105
Anatoliy I. Samsonov, Anatoliy N. Sobolenko Stand to measure torque moment of small scale power units.....	113
Valery V. Tarasov, Anatoly N. Sobolenko, Maxim I. Tarasov Efficiency of the application of regenerated motor oil alloying with additives in ship diesels of different forcing.....	116
Gennadiy P. Kicha, Andrey V. Nadezkin, Sergey P. Boiko The calculation regeneration parameters of self-cleaning filters for lubricant systems of ship diesels.....	123
Andrey V. Golenishev, Andrey V. Nadezkin, Mikhail E. Starchenko Tribology diagnostics of crosshead type diesels based on the simulation modeling.....	131
Mihail V. Gomzyakov, Ivan B. Druz Finding of weighting factors by factors of the influence of the ergatic element of the vessel on accidents at sea in the far east.....	136

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Igor M. Oroshchuk, Igor E. Gureev, Andrey N. Suchkov, Mikhail V. Soloviev The results of a study of spatial correlation characteristics of a single beam ionospheric decameter communication channel..... 145

Andrey N. Suchkov, Igor M. Oroshchuk, Mikhail V. Soloviev, Sergei L. Melnik Method of compensation of spatial correlation field of natural radio interference in digital antenna arrays with nonlinear signal processing..... 151

Igor M. Oroshchuk, Mikhail V. Soloviev, Andrey N. Suchkov, Aleksey A. Gavrilov The compensation method of the interference field of stationary radio interferences in short wave broadband radio channels... 157

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

Valeriy A. Pyatakovich, Victoria F. Rychkova, Evgenii G. Filippov Thr neural networks as the variant of computative structure of classification system of sea targets..... 163

Valeriy A. Pyatakovich, Victoria F. Rychkova, Alina V. Filippova, Natalia V. Pyatakovich The calculation of classification efficiency of targets of the untelligent navy system using complex of computing operations of neural networks..... 175

Valeriy A. Pyatakovich, Andrew B. Surov, Victoria F. Rychkova Optimal and adaptive methods to classify hydroacoustics signals in marine intelligent systems..... 186

Valeriy A. Pyatakovich, Alexander P. Purdenko, Victoria F. Rychkova, Evgenii G. Filippov The adaptive locally optimal strategy for managing the operation of the neural network system of classification of sea targets..... 195

Viktor V. Zavyalov, Viktor A. Agapov A method for improving the accuracy of the correlation lag based on pre-filtering signals at the input of the tracking circuit..... 205

Pavel A. Starodubtsev, Evgeniy A. Storozhok Identification of the signal source in the measuring node of the sea ecological and hydroacoustic monitoring system..... 212

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Ruslan V. Viktorov, Andrey O. Lipovetskiy Results of experimental studies on detection of swimmers with a developed structure of the interference hydroacoustic field in the coastal waters of the coastal wedge..... 215

Ruslan V. Viktorov, Mikhail V. Dyagilev, Alexander V. Krupenkov Experimental study of the possibility check the noise marine facility in adverse hydrological conditions when using adaptive noise filtering..... 223

Sergey V. Glushkov, Evgenia Y. Sobolevskaya, Natalya G. Levchenko Formation of training sample for information intelligent system of organization and management of arctic sea cargo transportation..... 230

Mihail V. Gomzyakov, Anatoliy N. Sobolenko. Digitalization of maritime surveillance in the Far Eastern 236

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Aleksandr A. Lugovets, Artem D. Sirotkin, Liubov V. Terenteva, Anatoliy A. Funtusov Determination of optimal number of berths in a seaport..... 244

Andrei I. Fisenko, Maksim A. Saltykov Fishing cluster: coefficient methodical approach to assessment potential and the possibility of formation in the Russian Far East..... 249

Vladimir A. Lazarev, Andrey I. Fisenko Transit potential of the Northern sea route..... 257

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Alexander S. Devyatisilnyi, Victor M. Grinyak, Artem V. Shurygin, Yurii S. Ivanenko Adjustment of multiposition observing system of beacons using trajectory measurements (In English)..... 262

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.030

УДК 629.5.015.4

Изучение взаимосвязи главных напряжений при разрушении морского льда

А.И. Мамонтов¹, М.В. Китаев¹, О.Э. Суков¹, В.В. Новиков¹¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Статья посвящена исследованию прочности морского льда. Методом исследования является сброс треугольного индентора (треугольный стальной клин) на поверхность морского льда, предварительно очищенную от верхнего слоя.

Для измерения давления, потенциальная энергия индентора до сброса вычисляется расчетным способом, а глубина отпечатка после падения измеряется экспериментально.

Экспериментальные данные собирались в разные годы. Температура льда во время проведения экспериментов была различной. В 2018г температура льда была -5°С. В 2019 году температура льда была -1°С. Сброс индентора производился с разных высот.

В результате эксперимента установлена взаимосвязь главных напряжений. При небольшом боковом сжатии льда, давление при котором лед разрушается существенно возрастает.

Особенностью этой работы является то, что эксперимент проводился в естественных условиях в одной из бухт г.Владивостока на расстоянии 200 метров от береговой линии, сброс индентора производился на очищенный морской лед. Этот метод исследования проще, чем сжатие образцов льда в лабораторных условиях, так как в последнем случае требуется специальное оборудование и трудоемкая организация проведения опытов.

Ключевые слова: предел прочности, главные напряжения, смятие льда, динамическое разрушение, индентор, давление разрушения.

Study of the principal stresses relation on sea ice crush

Andrey I. Mamontov¹, Maksim V. Kitaev¹, Oleg E. Surov¹, Valery V. Novikov¹¹Far Eastern Federal University

Abstract. The article is devoted to the study of the strength of sea ice. The research method is the discharge of a triangular indenter (triangular steel wedge) onto the surface of sea ice, previously cleaned from the upper layer.

To measure the pressure, the potential energy of the indenter before discharge is calculated, and the imprint depth after falling is measured experimentally.

Experimental data were collected in different years. The temperature of the ice during the experiments was different. In 2018, the ice temperature was -5 ° C. In 2019, the ice temperature was -1 ° C. The indenter was reset from different heights.

As a result of the experiment, the relationship of the main stresses was established. With a small lateral compression of ice, the pressure at which the ice is destroyed increases significantly.

A feature of this work is that the experiment was conducted under natural conditions in one of the bays of Vladivostok at a distance of 200 meters from the coastline, the indenter was discharged onto purified sea ice. This research method is simpler than compressing ice samples under laboratory conditions, since in the latter case special equipment and labor-intensive organization of experiments are required.

Key words: ultimate strength, principal stresses, ice crushing, dynamic fracture, indenter, fracture pressure.

Введение

Предел прочности льда на смятие, полученный в результате испытаний образцов, оказывается ниже, чем давление льда, оказываемое на корпус судна на практике.

Для того, чтобы решить эти противоречия В.А. Курдюмовым и Д.Е. Хейсиным была создана гидродинамическая модель удара твердого тела о лёд. В этой модели давления определяются с учётом выдавливания промежуточного слоя разрушенного льда [5].

Гидродинамическая модель не объясняет сложившегося противоречия: даже через промежуточный слой лёд оказывает большее давление на корпус судна, чем его предел прочности.

Повышение давления в момент удара корпуса судна о лёд может быть объясняется появлением объемного напряженно-деформированного

состояния льда в процессе внедрения твердого тела. Поэтому прочность льда повышается по сравнению с прочностью вырезанных цилиндрических образцов.

Опыты по сжатию образцов льда показывают, что при постоянной скорости деформации разрушающее напряжение значительно больше при двухосном сжатии, чем при одноосном.

В 1972 г. на международном симпозиуме «Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения», проводившимся в г. Ленинграде (Санкт-Петербург) был сделан доклад Роберта Фредеркинга из Канады об опытах на сжатие при постоянной скорости деформации, проводившихся на образцах столбчато-зернистого льда с помощью специального пресса, обеспечивающего двухосную деформацию образца. Установлено, что разрушающее давление, для случая двухстороннего сжатия, почти вдвое превышало напряжение при одноосном сжатии [4].

В 1973-1974 годах советскими исследователями В.В. Пановым и Н.В. Фокеевым была проведена серия наблюдений за льдами в условиях комбинированного нагружения. В лабораторных условиях исследовались цилиндрические образцы морского льда с соотношением высоты к диаметру 1.5. Образцы разрушались в условиях неравномерного объемного сжатия: $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3 > 0$. Боковое давление составляло 20, 40 и 60% от условного предела прочности при одноосном сжатии. Испытания носили кратковременный характер, образец доводили до разрушения с одного нагружения при непрерывном возрастании бокового давления. Прочность льда оказалась значительно больше, чем при одноосном сжатии. Зависимость увеличения осевых разрушающих напряжений от «удерживающих» боковых, см. рис. 10, темно-синяя область.

В 1986г. Робертом Федеркингем и Гарри Тимко опубликовано исследование повышения прочности морского льда при двухстороннем сжатии образцов льда с различных направлений относительно ориентации кристаллов. Отношение удерживающих и разрушающих напряжений 0.03-0.05 при -2°C . Максимальное напряжение достигает 7МПа [3].

В 1994 Эрландом Шульсоном и Смитом проведены опыты по всестороннему сжатию образцов льда. Прочность льда существенно увеличивается, если образец дополнительно сжимается. Отношение разрушающих и удерживающих напряжений 0.2 для 8МПа, 0.3 для 11МПа при -10°C и 0.1 для 9МПа и 0.15 для 11МПа при -40°C . Проведены испытания при всестороннем разрушающем напряжении. Разрушающее давление достигает 12МПа при -10°C и при -40°C [1].

Исследования повышения прочности льда продолжаются в настоящее время. Их результаты указывают на повышение разрушающих напряжений при повышении удерживающих напряжений.

Явление изменения разрушающего давления при изменении удерживающих напряжений известно может быть объяснено на основании гипотезы Кулона-Мора: при всестороннем сжатии происходит повышение предельных касательных напряжений, далее τ_n , при увеличении среднего нормального давления, далее σ_n , обусловленное внутренним трением в твердом теле. Взаимосвязь касательных и нормальных напряжений обуславливает взаимосвязь главных напряжений.

Цель этой работы: экспериментально определить модель материала Кулона-Мора для морского льда при динамическом разрушении в естественных условиях и определить как увеличиваются разрушающие напряжения σ_1 при увеличении сжимающих напряжений, σ_2, σ_3 .

Схема работы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема работы

Теоретическая зависимость давления от угла в вершине индентора

Вытянутая форма индентора позволяют решать задачу о нахождении давления льда в рамках плоского деформированного состояния [2] жесткопластического полупространства. Жесткопластический материал – это условный материал, у которого деформации либо отсутствуют, либо равны бесконечности. Физически это означает, что материал имеет пренебрежимо малые упругие деформации до разрушения и значительные после. Такое поведение материала свойственно разрушаемому морскому льду.

Теоретическая зависимость давления от угла в вершине индентора выражается зависимостью (1):

$$p_{(1)}(\beta) = \frac{1 + \sin(\rho)}{1 - \sin(\rho)} \cdot c \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(2 \cdot \beta \cdot \tan(\rho)) - c \cdot \cot(\rho), \quad (1)$$

где

c и ρ – параметры модели материала Кулона-Мора,
 β – угол в вершине индентора, см. рис. 5.

Видно, что форма функции $p_{(1)}(\beta)$ меняется в зависимости от параметров c и ρ по разному: при изменении « c » каждая точка функции пропорционально увеличивает ординату, при изменении « ρ » каждая точка функции меняет ординату не пропорционально. Каждой линии $p_{(1)}(\beta)$ соответствует одна единственная комбинация параметров модели материала c и ρ . Если определить значения, при которых теоретическая зависимость, $p_{(1)}(\beta)$ совпадет с линией тренда экспериментальных данных, $p_{(2)}(\beta)$, то эта единственная пара значений c и ρ будет являться параметрами модели материала Кулон-Мора для морского льда.

Экспериментальные данные: зависимости давления от угла в вершине индентора для 2018 и 2019гг.

Эксперимент представляет собой сброс треугольных стальных инденторов на очищенную от верхнего слоя поверхность морского льда, см. рис. 2. Индентор представляет собой треугольный в плане клин с углом в вершине β . В результате сброса в поверхности льда получается отпечаток. Пример отпечатка показан на рис. 3.

Перед экспериментом лед очищается от верхнего слоя специальной машиной. При очистке образуется круглое в плане углубление, в центре которого отверстие. Индентор сбрасывается на очищенный от верхнего слоя лед между краем углубления и отверстием. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

Эксперимент проводился в 2018 и 2019гг. в бухте Новик Приморского края. В 2018 году температура льда была -5°C и сброс инденторов производился с фиксированной высоты. В 2019 году температура льда была -1°C и сброс инденторов производился с разных высот.

Для определения экспериментальной зависимости давления от угла используется внедрение индентора в поверхность морского льда при сбросе.

Давление льда определяется на основании равенства потенциальной энергии индентора и работы, совершаемой при торможении клина.

Введем следующие обозначения:

- p - давление при разрушении льда на индентор, кПа;
- D - глубина отпечатка, м;
- $b = 0.15 \text{ м}$ - длина индентора между торцами;
- h - высота сброса, м;
- β_1 - угол в вершине индентора, град.,
- β - угол в вершине отпечатка, град.,
- F_z - суммарная вертикальная сила, Н.



Рис. 2. Индентор с грузом перед сбросом



Рис. 3. Отпечаток

Схема для определения давления показана на рис. 5.

Результаты эксперимента 2019 года представлены в табл. 1. Результаты эксперимента 2018 года представлены в табл. 2.

На рис. 6 крестами отмечены данные эксперимента 2019г. На рис. 7 крестами отмечены данные эксперимента 2018г. Сплошные являются линиями тренда – $p_{(2)}(\beta)$. Точками отмечены теоретические зависимости $p_{(1)}(\beta)$.

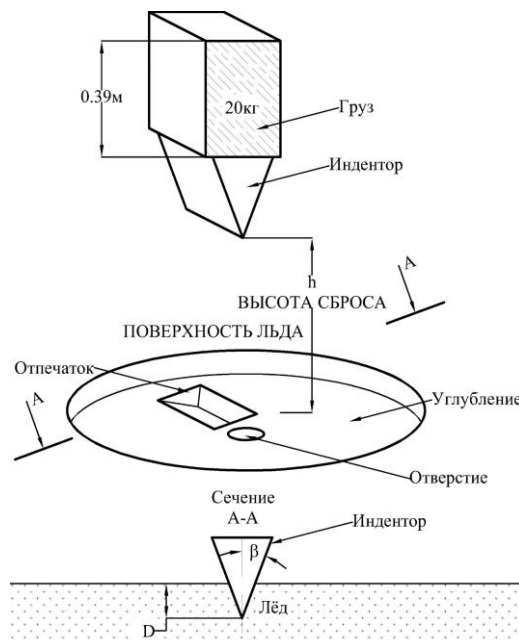


Рис. 4. Схема эксперимента

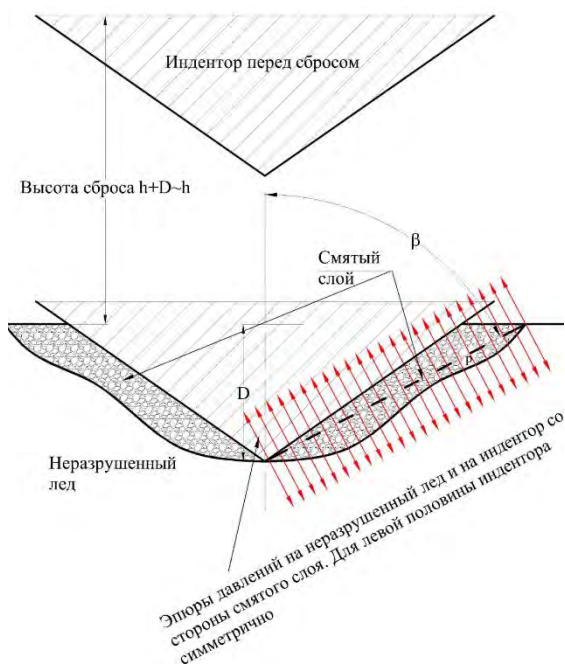


Рис. 5. Схема определения давления

Давление льда на индентор равно:

$$p_{(2)}(\beta) = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot h}{\tan(\beta) \cdot D^2 \cdot b} \quad (2)$$

В работе строится две зависимости: экспериментальная зависимость давления от угла в вершине индентора, $p_{(2)}(\beta)$, и теоретическая, $p_{(1)}(\beta)$. Параметрами модели материала Кулона-Мора для морского льда являются значения, при которых теоретическая совпадает с экспериментальной, то есть когда $p_{(2)}(\beta) = p_{(1)}(\beta)$, во всем диапазоне изменения угла в вершине индентора, β .

Серыми точками отмечены теоретические зависимости $p_{(1)}(\beta)$, которые не совпадают с линией тренда. Оранжевыми точками отмечены совпадающие зависимости. Сводные данные по определению параметров s и ρ представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что параметрами модели материала Кулона-Мора для морского льда для 2018г., -5°C является $\rho=60$ град., $s=30$ кПа, для 2019г., -1°C является $\rho=69.8$ град., $s=2.25$ кПа.

Определение взаимосвязи главных напряжений

Рассмотрим образец материала, разрушаемый осевым давлением p . Давление p создает в образце осевые разрушающие напряжения σ_1 . Дополнительно образец сжимается с боков удерживающими напряжениями σ_2, σ_3 , как показано на рис. 8.

Установить взаимосвязь между разрушающими и удерживающими напряжениями позволяет модель материала Кулона-Мора.

Линия модели материала морского льда задается двумя параметрами: ρ и s , где ρ – угол наклона линии к оси OX, s – сцепление или константа. По этим данным строится прямая линия, модель материала Кулона-Мора, наклоненная под

углом ρ к оси σ_1 , см. рис. 9. По модели материала Кулона-Мора определяется взаимосвязь главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Таблица 1

Результаты эксперимента 2019 года

№ сброса	Угол в вершине индентора,	Масса индентора,	Высота сброса,	Средний угол отпечатка,	Средняя глубина вдавливания	Давление,
	β_1					
	град.	кг	м	град.	м	МПа
1	63.4	28	0.11	55.8	0.004	7.30
2	63.4	28	0.11		0.005	6.29
3	63.4	28	0.11		0.004	10.20
4	63.4	28	0.11		0.005	5.48
5	63.4	28	0.11		0.004	10.20
6	63.4	28	0.11		0.004	8.57
7	63.4	28	0.11		0.004	11.19
8	59.04	28	0.12		59.9	0.006
9	59.04	28	0.12	0.004		6.78
10	59.04	28	0.12	0.006		3.18
11	44.4	28	0.18	54.0	0.008	3.74
12	44.4	28	0.18		0.010	2.24
13	44.4	28	0.18		0.009	3.19
14	44.4	28	0.18		0.007	4.89
15	44.4	28	0.18		0.008	3.74
16	25.1	28	0.48		44.5	0.022
17	25.1	28	0.48	0.025		1.43
18	25.1	28	0.48	0.030		0.97
19	25.1	28	0.48	0.024		1.60
20	25.1	28	0.48	0.027		1.20
21	10.2	4.32	2.7	38.5	0.028	1.25
22	10.2	4.32	2.7		0.027	1.28
23	10.2	4.32	2.7		0.026	1.46
24	10.2	4.32	2.7		0.031	0.98
25	10.2	4.32	2.7		0.032	0.94
26	10.2	4.32	2.7		0.032	0.94

Таблица 2

Результаты эксперимента 2018 года

Угол в вершине индентора,	Средний угол отпечатка,	Масса индентора,	Высота сброса,	Глубина,	Давление,
β_1	β				
град.	град.	кг	м	м	МПа
63.4	55.8	22	1.7	0.012	8.51
63.4	55.8	22	1.75	0.0115	9.53
63.4	55.8	22	1.5	0.0116	8.03
25.1	44.5	22	0.924	0.025	4.54
25.1	44.5	22	1.63	0.036	3.86
25.1	44.5	22	1.61	0.0427	2.71
44.4	54	22	1.53	0.022	4.64
44.4	54	22	1.37	0.022	4.16

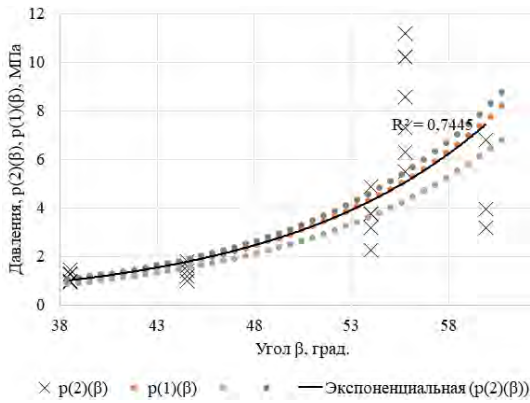


Рис. 6. Данные эксперимента 2019г.

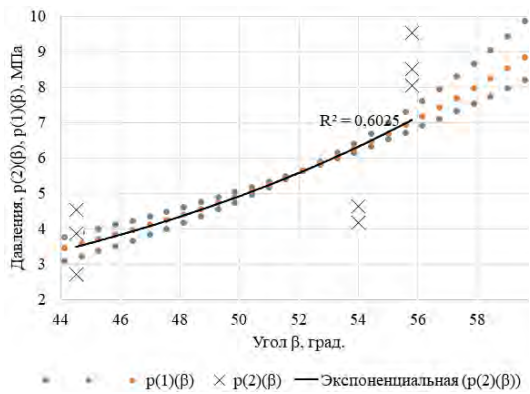


Рис. 7. Данные эксперимента 2018г.

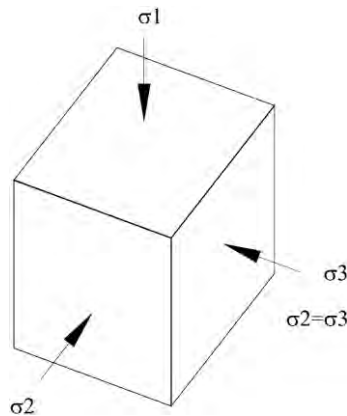


Рис. 8. Сжатие образца морского льда

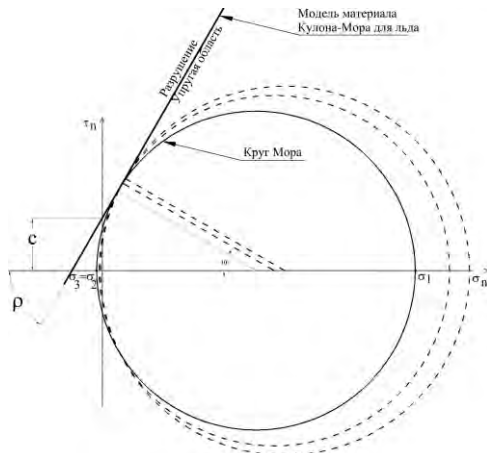


Рис. 9. Круг Мора и модель материала Кулона-Мора

Взаимосвязи главных напряжений для 2018 и 2019гг. при разных температурах представлены на рис. 10.

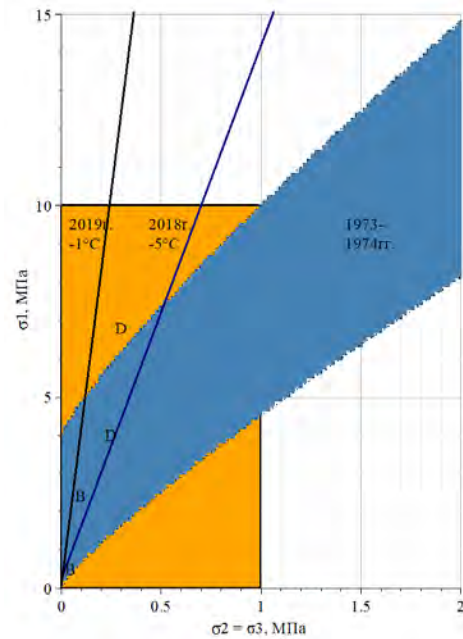


Рис. 10. Взаимосвязь главных напряжений при разрушении образца морского льда

Модель материала Кулона-Мора очерчивает границу разрушенного и упругого состояния тела, поэтому круг Мора, показанный штриховыми линиями, пересекает линию модели материала в единственной точке. Прямая является касательной, центр круга находится на оси σ_n и пересекает ось в точках $\sigma_2 = \sigma_3$ и σ_1 . Модель материала Кулона мора определяет закон изменения главных напряжений: при увеличении сжимающих напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ растут разрушающие напряжения σ_1 и наоборот.

Параметры модели материала Кулона-мора определены, см. табл. 3. По ним строится модель Кулона-Мора и определяется взаимосвязь главных напряжений.

Таблица 3
Определение параметров c и ρ

2018г., $t = -5^\circ\text{C}$			
Параметры		Цвет маркера	Примечание
c , кПа	ρ , град.		
12	65	серый	не совпадает
60	55	серый	не совпадает
30	60	оранжевый	совпадает
2019г., $t = -1^\circ\text{C}$			
Параметры		Цвет маркера	Примечание
c , кПа	ρ , град.		
2.25	69.2	серый	не совпадает
2.4	69.8	серый	не совпадает
2.25	69.8	оранжевый	совпадает

Заключение

В работе был проведен относительно простой эксперимент по сбросу инденторов на морской, очищенный лед.

Экспериментально установлена взаимосвязь главных напряжений при динамическом разрушении льда в естественных условиях. При небольшом возрастании удерживающих напряжений 0.05-0.5МПа происходит существенный рост прочности льда 1-10МПа.

Угол внутреннего трения модели материала льда составляет значительную величину, достигает 70° при -1°С и 65° при -5°С. Сцепление 2.25кПа и 12кПа, соответственно.

При повышении температуры морского льда с -5°С до -1°С сцепление снижается в 5 раз. Угол внутреннего трения почти не изменяется.

Полученный угол трения существенно выше угла внутреннего трения для большинства сыпучих тел: при небольшом сжатии существенно повышается сопротивление срезу. Особенно это проявляется для талого льда при около нулевой температуре. Лед имеет неоднородную структуру, и такая особенность может объясняться перестроением структуры при сжатии до разрушения.

Графики зависимости напряжений представлены на рис. 7 в виде двух линий для 2018 г. и 2019 г. Область разрушающего и удерживающего давлений, действующих на индентор в эксперименте, отмечена прямоугольником.

Установленная взаимосвязь напряжений позволяет моделировать разрушение морского льда льдом с учетом изменения напряженного состояния

в области контакта. Определить время действия и форму эпюры ледового давления.

В диапазоне давлений льда взаимосвязь напряжений почти согласуются с экспериментальными данными, полученными на образцах морского льда в разное время.

Для сравнения с результатами, полученными ранее, сверху на графики нанесены: данные 1973-1974гг. – отмечены синей полосой, данные 1986г Роберта Федеркинга и Гарри Тимко – отмечены буквами «В» и «D», в зависимости от ориентации направления сжатия-удержания относительно расположения кристаллов льда.

Модель Кулона-Мора не учитывает особенности поведения твердых тел при разрушении, которые подчиняются более сложным математическим зависимостям.

В области повышенных значений давления линии взаимосвязи главных напряжений, возможно, будут иметь меньший наклон. Например, в 1973-1974гг. при увеличении удерживающего давления с 0 до 1МПа разрушающее давление увеличилось на 6 МПа а при увеличении удерживающего давления с 1 до 2 МПа разрушающее давление увеличилось на 5МПа. При изменении направления разрушения образцов относительно ориентации кристаллов давление менялось на 10-50% в зависимости от диапазона.

Для внедрения индентора в морской лед при более высоких значениях давления 10-20МПа требуется применять другое экспериментальное оборудование.

Литература

1. Смит Т.Р., Шульсон Е.М. Хрупкое сжатие разрушения соленого воды столбчатого льда при двухосном нагружении. *J Glaciol* 1994; 40: 265–76.
2. Соколовский В.В. Теория пластичности. Изд. 3. М.: Высшая школа, 1969. 80 с.
3. Тимко Г, Фреркинг Р. Испытания на сжатие в стесненных условиях: определение зоны разрушения столбчатого морского льда. *Cold Reg Sci Technol* 1986; 12: 13–28.
4. Фредеркинг Р. Предварительные данные по плоским деформациям при испытании зернистого льда на сжатие // Сб. науч. Тр. Симпозиума МАГИ.-1972.-Л.:Лед и его воздействия на гидротехнические сооружения.-С.64-69.
5. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А., Курдюмов В.А., 1975. «Определение удельной энергии разрушения и контактных давлений, возникающих при воздействии твердого тела на лед», симпозиум по физическим методам изучения снега и льда, Ленинград, 1975. - 382 с.

References

1. Smith TR, Schulson EM. Brittle Compressive Failure of Salt-Water Columnar Ice Under Biaxial Loading. *J Glaciol* 1994;40:265–76.
2. Sokolovsky V.V. Theory of Plasticity. M., Higher School, 1969, 80 p.
3. Timco GW, Freerking R. Confined Compression Tests-outlining the Failure Envelope of Columnar Sea Ice. *Cold Reg Sci Technol* 1986;12:13–28.
4. Frederking R. Preliminary Data on Flat Deformations During Compression Testing of Granular Ice // Sat. scientific Tr. MAGI Symposium .-1972.-L.: Ice and its effects on hydraulic structures.-S.64-69.
5. Kheisin, D.E., Likhomanov, V.A., Kurdyumov, V.A., 1975 "Determination of Specific Breakup Energy and Contact Pressures Produced by the Impact of a Solid Against Ice", Symp. on Physical Methods in Studying Snow and Ice, Leningrad, CRREL Translation TL539, 1975.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мамонтов Андрей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 730, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

Китаев Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 729, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Суров Олег Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 6, С 614, e-mail: surov.oye@dvfu.ru

Новиков Валерий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 719, e-mail: leka230243@gmail.com

Andrey i. Mamontov, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

Maksim V. Kitaev, Ph.D. (Eng), Associate professor, the Head of Shipbuilding and Ocean Engineering Department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Oleg E. Surov, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: surov.oe@dvfu.ru

Valery V. Novikov, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: leka230243@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.061

УДК 656.614.3+629.5.017

Проблемы обеспечения несмещаемости груза при перевозках зерна навалом на универсальных судах

М.А. Москаленко¹, Т.Е. Маликова¹, С.М. Затепакин¹, И.Б. Друзь¹¹Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского

Аннотация. Морская отрасль является важнейшим звеном в международной торговле, так как морские суда представляют собой наиболее рентабельный способ доставки больших партий массовых грузов на значительные расстояния. Современная логистика перевозок массовых навалочных грузов идет по пути увеличения судовых партий и как следствие, за счет экономии издержек на эффекте масштаба последние годы произошел существенный рост размеров универсальных судов. На универсальных судах, за счет роста торговли продовольствием и сужения фрахтового рынка, в последние годы стали активно перевозиться зерновые навалочные грузы. Известно, что смещение навалочных грузов было связано с большими рисками опрокидывания от потери остойчивости для балкеров, где от потери остойчивости происходит более 46 процентов всех серьезных аварийных случаев. Проблема обеспечения остойчивости становится еще более актуальной при перевозке зерновых навалочных грузов, имеющих усадку примерно в два процента от своего объема, за счет чего во время рейса всегда образуются пустоты в трюмах между свободной поверхностью груза и палубой. Предполагается, что при максимально возможном смещении зерна его свободная поверхность образует с горизонталью углы в 15 и 25 градусов для заполненных и соответственно незаполненных отсеков. Для универсальных судов риски потери остойчивости от смещения груза при перевозках зерна, за счет масштабного эффекта большой удельной погрузочной кубатуры трюмов и высоты борта возрастают многократно.

Ключевые слова: зерновой навалочный груз, остойчивость, смещение груза, неразжижающийся навалочный груз.

Problems of ensuring non displacement cargo during transportation of grain in bulk on universal vessel

Mikhail A. Moskalenko¹, Tatyana E. Malikova¹, Sergey M. Zatepyakin¹, Ivan B. Druz¹¹Marine State University named after admiral G. I. Nevelskoy

Abstract. The Maritime industry is an important link in international trade because sea vessels are the most cost-effective way to deliver large quantities of bulk cargo over long distances. Modern transportation of cargo in bulk is on the path of increasing of shiploads and as a result, due to effective on scale effect, there has been a significant increase in the size of universal vessels in recent years. Grain bulk cargo has been actively transported on universal vessels in recent years due to the growth of food trade and the segmentation of the freight market. It is known fact that the displacement of bulk cargo in the vessel holds was associated with high risks of overturning from loss of stability for bulk carriers. More than 46 percent of all serious accidents occur from loss of stability. The problem of ensuring stability becomes even more urgent when transporting grain bulk cargo, which has a shrinkage of about two percent of its volume, which is a reason of free surface between the cargo and the deck inside of vessel holds. It is assumed that at the maximum possible displacement of the grain, its free surface forms angles of 15 and 25 degrees with the horizontal for filled and unfilled compartments, respectively. For multipurpose universal vessels, the risks of loss of stability during grain transportation due to cargo displacement and because of the large-scale effect of the large loading cubic capacity of the holds and the height of the side, increase many times.

Keywords: grain bulk cargo, stability, displacement of cargo, non-liquefying bulk cargo.

Введение

Балкерные перевозки очень развиты в мировой торговле и в последнее время из-за нехватки специализированных судов, малого и среднего тоннажа, все чаще в фидерных перевозках осуществляются универсальными судами, специально не оборудованными для перевозки навалочных грузов. Учитывая факт недоиспользования вместимости трюмов, аварии от потери остойчивости (в частности, неспециализированных судов), как правило, из-за смещения грузов, носят ежегодный систематический характер [1,2].

Проблема перевозок усугубляется тем обстоятельством, что навалочный груз имеет маленький удельный погрузочный объем (много меньше удельной погрузочной кубатуры судна) и грузоподъемность судна выбирается гораздо

быстрее заполнения вместимости трюмов. Оставшиеся пустоты и развитая сыпучесть груза создают значительные сложности обеспечения несмещаемости и достаточной остойчивости для безопасной эксплуатации судна [3].

Обращаясь к перевозкам зерновых навалочных грузов, следует отметить, что динамика смещения груза (на универсальных судах) не в достаточной степени изучена. На сегодняшний день отсутствуют надежные теоретические и экспериментальные методы, позволяющие строго решать задачи смещения груза и влияния на остойчивость судна. При некоторых углах крена зерновой груз вообще не смещается, а затем резко сползает на один борт большим пластом с плоской поверхностью, что приводит к внезапному уменьшению восстанавливающего момента [4].

В настоящее время разработано большое количество предупредительных методов по

ограничению смещения зерна, что достаточно полно изложено в правилах и кодексах ИМО [5].

Однако применение правил в каждом конкретном случае на практике (в частности, для неспециализированных судов) вызывает существенные сложности при погрузке и последующей безаварийной эксплуатации судна.

Нами предложено рассматривать задачу несмещаемости в статической постановке и исследовать ее методами математической теории бифуркаций [6]. С этих позиций зерновой груз обладает потенциальной способностью к смещению как система материальных точек, зависящая от их взаимного расположения, под воздействием массовых сил [7]. Система обладает потенциальной энергией Π , которая равна работе сил при наклонениях судна. Такая система относится к разряду консервативных, т. е. к системам, где работа действующих сил зависит исключительно от начального и конечного положения системы. Поэтому, для решения задач по оценке смещаемости груза (переводе системы в неустойчивое равновесие) определяющим является приращение потенциальной энергии $\Delta\Pi$ при наклонениях. Естественно, что в случае смещения груза, за счет изменения формы его поперечного сечения, центр тяжести груза будет изменять свое местоположение (см. рис. 1). При этом, потенциальная энергия системы Π_0 получит некоторое приращение $\Delta\Pi$.

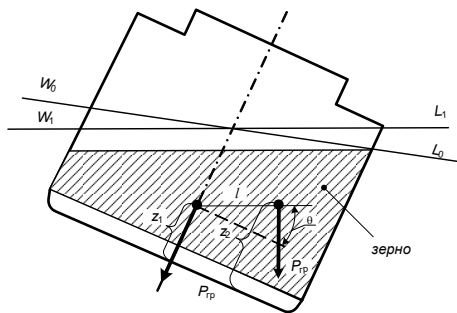


Рис. 1. Расчетная схема смещаемости зернового груза

Рассмотрев задачу в статической постановке на перемещениях $\Pi_0 \rightarrow \Pi_1$ нетрудно получить следующие выражения для $\Delta\Pi$:

$$\begin{aligned} \Delta\Pi &= \Pi_0 - \Pi_1 = P_{гр} (z_1 - z_2) = \\ &= P_{гр} (z_1 - (z_1 + l \sin\theta)) = Pl \sin\theta \approx P l \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

но

$$\begin{aligned} M_{кр} &= P l \theta; \\ M_B &= \Delta h \theta, \end{aligned}$$

где Δ – массовое водоизмещение, h – начальная метацентрическая высота.

Следовательно,

$$\Delta\Pi = P l \theta = \Delta h \theta. \quad (2)$$

Обратившись к диаграмме статической устойчивости можно определить потенциальную способность судна противостоять кренящему моменту вплоть до состояния неустойчивого равновесия (см. рис. 2), т. е. вплоть до угла крена $\theta_1 = 40^\circ$. При этом уравненные площади диаграммы статической устойчивости (ДСО) – ΔOAB и ΔBCD , дают условие динамического равновесия судна.

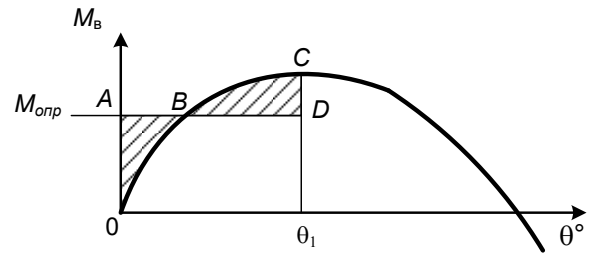


Рис. 2. Схема определения опрокидывающего момента

Угол $\theta_1 = 40^\circ$ выбран согласно требованиям международных правил к устойчивости для неспециализированных судов, перевозящих зерно навалом (см. рис. 3). Требования включают в себя следующие ограничения:

1. Метацентрическая высота, исправленная на не менее 0,30 м на всем переходе.
2. Угол крена судна от пересыпания зерна во всех грузовых помещениях не более 12° .
3. Остаточная площадь (ДСО) между кривой плеч восстанавливающего и кренящего моментов в пределах от угла крена (от пересыпания зерна) до 40° (или когда палуба входит в воду) не менее 0,075 м на радиан (4,3 м на градус). Иначе говоря, с углом заливания в 40° и плечом $L_{ст} > 0,307$ м, условие по площади составляет:

$$S = 0,5 (l_{ст} - l_{кр}/BC) \times (40^\circ - \theta) / BD, \quad (3)$$

$$h = z_m - z_g,$$

$$M_{кр} = \sum M_{усл.кр} / (УПО),$$

где момент $M_{усл.кр}$ – указан в информации об устойчивости; $l_{кр} = M_{кр} / \Delta$; угол крена от перемещения зерна $\theta = 57,3^\circ M_{кр} / \Delta h$, (УПО) – удельный погрузочный объем груза.

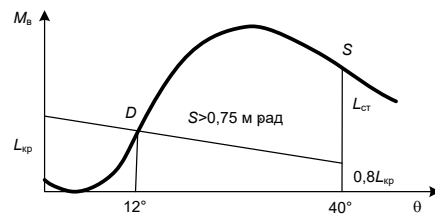


Рис. 3. Определение угла крена

Работа, совершаемая кренящим моментом (см. рис. 2) равна:

$$A_{кр} = M_{кр} \theta_1 = \Delta h \theta^2, \quad (4)$$

учитывая систему:

$$\begin{cases} \Delta\Pi = \Delta h \theta \\ A\Pi = \Delta h \theta^2 \end{cases}$$

получим $A_{кр} = \Delta\Pi \theta$ – условие материального баланса энергии.

Это условие, по нашему мнению, с учетом запаса устойчивости следует переписать в виде критерия $A_{кр} \geq \Delta\Pi \theta_1$ или с учетом ограничений (см. рис. 3):

$$A_{кр} \geq 0,698 \Delta\Pi. \quad (5)$$

Неравенство (5) можно рассматривать как конечное условие обеспечения устойчивости судна при перевозках зерна на неспециализированных судах и отвечающее требованиям международных правил.

Общий замысел практического использования результатов исследования состоит в создании

управляемой системы с обратной связью «судно – груз». Управляющий сигнал (регулятор) определяет уровень $\Delta\Pi$ для устройств (методов, мероприятий) или управляющих алгоритмов) необходимых для перевода системы в состояние устойчивого равновесия (см. рис. 4).



Рис. 4. Блок схема работы управляющего сигнала

Математическая модель предложенной системы выражается через приращение $\Delta\Pi$ потенциальной функции, записанной в виде [8,9]:

$$\Delta\Pi = \eta^4 + \lambda^2\eta^2 + \lambda\eta, \quad (6)$$

здесь обозначено $\eta = \max M_{кр} / M_{кр}$.

Построены графики по данным исследования потенциальной функции в численной реализации зависимостей:

$$\begin{cases} U = 4\eta^3 + 2\lambda^2\eta + \lambda \\ U' = 12\eta^2 + 2\lambda^2 \end{cases}, \quad (7)$$

$$U = \frac{d\Delta\Pi}{d\eta}.$$

Расшифровка этих зависимостей (для нормы функции в реальном диапазоне) однозначно определяют устойчивость системы с точки зрения внезапного приращения потенциальной энергии, что позволило выявить качественно новые закономерности. Прежде всего, удалось в рамках критерия бифуркации процесса, установить особый вид ветвления, а именно, границу перехода системы из состояния устойчивого в неустойчивое равновесие (предкатастрофическое состояние – перед потерей судном остойчивости).



Рис. 5. Катастрофические изменения состояния системы

Из графика (см. рис. 5) видно, что для перевода системы в состоянии устойчивого равновесия необходимо понизить значение энергетического параметра η до нулевого уровня, или перевести его в область положительных значений с помощью условного регулятора с обратной связью по уровню $\Delta\Pi$, т. е. $\sum \Delta\Pi_{рег} \geq \Delta\Pi$ (см. рис. 6). Тем самым, можно предотвратить качественный скачок системы на другой энергетический уровень с потерей равновесия по бифуркационному сценарию.

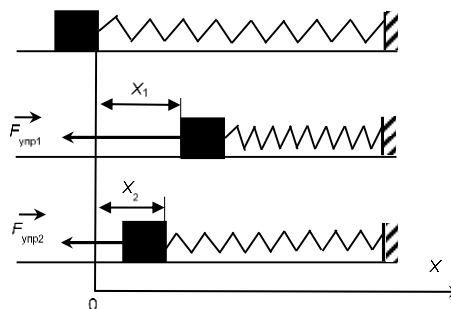


Рис. 6. Условная схема регулятора

Работа по перемещению груза, осуществляемая регулятором, численно зависит от силы и координат:

$$\begin{aligned} A_{рег} &= 0,5(F_1 + F_2) \times (x_1 + x_2) = \\ &= (kx_1^2 - kx_2^2) / 2 = \Pi_{пер1} - \Pi_{пер2} \end{aligned}, \quad (8)$$

где k – коэффициент жесткости регулятора, x – абсолютная деформации.

Таким образом, работа сил при перемещении груза равна изменению потенциальной энергии регулятора, взятой с обратным знаком. Под регулятором можно понимать, как устройства для крепления груза, так и комплекс управляющих мероприятий или технических средств способных повлиять на смещаемость груза в трюмах.

Выводы

1. Предложенная методология обеспечения несмещаемости груза при перевозке зерна навалом, в соответствии с действующими правилами, позволяет быстро и надежно оценить возможность безопасной перевозки и предложить оптимальные методы крепления для конкретного неспециализированного судна.
2. Полученные результаты можно распространить, также для случаев перевозки неразжижающихся навалочных грузов на неспециализированных фидерных судах

Литература

1. Маликова Т. Е. Аварийность морского флота и анализ внешних факторов, повлекших за собой аварии со смещением грузов / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1–2. – С. 162–165.
2. Блехман И. И. К проблеме аварий судов со смещающимися грузами / И. И. Блехман, И. В. Демидов, Ю. А. Семенов // В сборнике: III Международная Школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2016 Сборник трудов. Российский научный фонд, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН; Под редакцией В. К. Асташева, В. Л. Крупенина, Г. Я. Пановко, К. Б. Саламандра. – 2016. – С. 28–34.
3. Коробцов, В. И. Расчет подпалубных пустот при перевозке зерна насыпью / В. И. Коробцов, Е. Н. Безкровный // Морской флот, 1969. – № 12. – С. 13–14.
4. Коробцов, В. И. Изменение некоторых физико-механических свойств зернового груза и закономерности перемещения его в условиях морской перевозки / В. И. Коробцов // Технология безопасной перевозки грузов морем. Тр. ЦНИИМФ, 1964. – Вып. 56. – С. 59–64.
5. Правила перевозки зерна/Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2006. 36с.
6. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – 2-е изд., доп. – М. : Изд-во МГУ, 1983. – 80 с.
7. Клименко Е. Н. Использование метода Нелдера-Мида для определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна / Е. Н. Клименко, В. Д. Савчук // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. – 2014. – № 3 (8). – С. 41–46.
8. Москаленко М. А. Адаптация моделей теории катастроф для исследования остойчивости судов при смещении грузов / М. А. Москаленко, Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Пленарные доклады десятой международной научно-практической конференции. – Владивосток: ДВО РАТ, 2013. – С 217–218.
9. Poston T. Catastrophe Theory and Its Applications / T. Poston, I. Stewart. // Dover Books on Mathematics. – N. Y. : Dover Publications, 2012. – 512 p.

References

1. Malikova, T. E. Avariinost' morskogo flota i analiz vnechnikh faktorov, povlekchikh za soboi avarii so smescheniem грузов [The accident rate of the navy and the analysis of external factors that led to accidents with the displacement of goods], T. E. Malikova, Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2014. № 1,2. S. 162–165.
2. Blekhan I. I. K probleme avarii sudov so smeschaiuschimisia грузами [To the problem of accidents of ships with moving loads] I. I. Blekhan, I. V. Demidov, I. U. A. Semenov, V sbornike: III Mezhdunarodnaia shkola-konferentsia molodykh uchenvykh «Nelineinaia dinamika mashin» School-NDM 2016 Sbornik trudov. Rossiiskii nauchnyi fond, Institut mashinovedeniia im. A. A. Blagonravova RAN; pod redaktsiei V. K. Astacheva, V. L. Krupenina, G. IA. Panovko, K. B. Salamandra. 2016. S. 28–34.
3. Korobtsov, V. I. Raschet podpalubnykh pustot pri перевозке зерна nasyp'iu [Calculation of below deck voids when transporting grain in bulk]. V. I. Korobtsov, E. N. Bez-krovnyia, Morskoi flot, 1969. № 12. S. 13–14.
4. Korobtsov, V. I. Izmenenie nekotorykh fiziko-mekhanicheskikh svoistv zernovogo груза i zakonornosti peremescheniia ego v usloviakh morskoi perevozki [Change in some physical and mechanical properties of grain cargo and patterns of its movement in conditions of sea transportation]. V. I. Korobtsov, Tekhnologiya bezopasnoi perevozki грузов morem. Tr. TSNIMF, 1964. Vyp. 56. S. 59–64.
5. Pravila perevozki zerna [Rules for grain transportation]. Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. S-Pb., 2006. 36 s.
6. Arnol'd, V. I. Teoriia katastrof [Catastrophe theory]. V. I. Arnol'd. 2-e izd., dop. M., izd-vo MGU, 1983. 80 s.
7. Klimenko E. N. Ispol'zovanie metoda Neldera-Mida dlia opredeleniia konfiguratsii poverkhnosti nasypnogo груза v tryume sudna [Using the Nelder-Mead method to determine the surface configuration of bulk cargo in the hold]. E. N. Klimenko, V. D. Savchuk, Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Uchakova. 2014. № 3 (8). S. 41–46.
8. Moskalenko M. A. Adaptatsiya modelei teorii katastrof dlia issledovaniia ostoichivosti sudov pri smeshhenii грузов [Adaptation of catastrophe theory models to study the stability of ships during cargo displacement]. M. A. Moskalenko, T. E. Malikova, Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Plenarnyye doklady desiatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. – Vladivostok: DVO RAT, 2013. S 217–218.
9. Poston T. Catastrophe Theory and Its Applications. T. Poston, I. Stewart. Dover Books on Mathematics. N. Y.: Dover Publications, 2012. 512 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Анатольевич Москаленко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теории и устройства судна, Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: asmsh@rambler.ru

Mikhail A. Moskalenko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the department of ship theory and arrangement, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: asmsh@rambler.ru.

Татьяна Егоровна Маликова, доктор технических наук, доцент кафедры Теории и устройства судна, Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: t-malik@msun.ru.

Tatyana E. Malikova, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor of the department of ship theory and arrangement, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: t-malik@msun.ru.

Сергей Михайлович Затепакин, Начальник научно-исследовательского отдела управления научно-исследовательской и инновационной деятельности Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: s.zatepyakin@gmail.com.

Sergey M. Zatepyakin, Director of the Research Department of the Directorate of Research and Innovation Activity, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: s.zatepyakin@gmail.com

Иван Борисович Друзь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов, Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: druz_i_b@mail.ru.

Ivan B. Druz, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the department of theoretical mechanics and strength of materials, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: druz_i_b@mail.ru.

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.059

УДК 621.791.05

Особенности обеспечения конструктивной безопасности морских судов при действии нагрузок от ударов волн

М.А. Москаленко¹, И.Б. Друзь¹, В.М. Москаленко¹, С.М. Затепакин¹¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Современный судоходный рынок характеризуется увеличением специализации флота с одновременным ростом размеров судов, с целью экономии издержек на эффекте масштаба. Тем не менее на судно значительных размерений, даже находящееся в полном грузу, на встречном волнении действуют экстремальные нагрузки от ударов волн в днище и развал бортов. С учетом прямолинейности обводов большинства торговых судов возникающие экстремальные усилия в оконечностях, обусловлены в основном действием слеминга, випинга и заливаемости (от наката волн). Дополнительные нагрузки при погружении в воду оконечности и выходе из воды, при оголении корпуса характеризуются высокими коэффициентами динамичности, что приводит к внезапному росту уровня напряжений в пластинах и продольном наборе, который способен существенно превысить расчетные и допустимые параметры. С целью уменьшения динамичности ударных нагрузок суда вынужденно снижают скорость, что ограничено в основном явлением бродинга при внезапной постановке судна лагом к волне. При малых скоростях хода ударные нагрузки в определенной степени линеаризуются и не зависят от формы обводов корпуса в той мере, как для быстроходных судов. Статистика аварийности морских судов свидетельствует, что при неблагоприятном сочетании экстремальных нагрузок от действия волн возможно появление опасных трещин и переломы судов в сечениях оконечностей, где расчетные изгибающие моменты имеют минимальные значения. Подобные аварии с исчерпанием уровня конструктивной безопасности происходят с завидной регулярностью, как на новых судах, так и на судах, имеющих значительные сроки эксплуатации. Аварии принято объяснять ростом уровня эффективной концентрации напряжений, связанной с увеличением числа прерывистых связей при оптимизации веса корпуса современного морского судна. Анализ натурных экспериментов и остаточных повреждений корпусов судов, проведенный авторами, позволил выявить ряд существенных особенностей в работе конструкций при действии ударных нагрузок, которые ранее выпадали из поля зрения отраслевой науки. Авторами, в работе, указанные особенности рассматриваются на адекватных математических моделях.

Ключевые слова: ударные нагрузки, борт, днище, трещины, конструктивная безопасность, потеря устойчивости.

Features ensure structural safety ships under the action of loads from shock waves

Mikhail A. Moskalenko¹, Ivan B. Druz¹, Vladislav M. Moskalenko¹, Sergey M. Zatepyakin¹¹Marine State University named after G. I. Nevelskoy

Abstract. The modern shipping market is characterized by an increase in the specialization fleet with the simultaneous increase in the ships size, in order to save costs on the scale effect. Nevertheless, the vessel of considerable dimensions, even being in full load, on the counter wave are extreme loads from the shock waves in the bottom and collapse of the sides. Taking into account the straightness of the contours of most merchant ships, the extreme forces at the extremities are mainly due to the action of slamming, whipping and flooding (from the rolling of waves). Additional loads when submerging the tip and leaving the water, when the hull is exposed, are characterized by high dynamic coefficients, which leads to a sudden increase in the stress level in the plates and the longitudinal set, which can significantly exceed the calculated and permissible parameters. In order to reduce the dynamism of shock loads, the vessels are forced to reduce the speed, which is limited mainly by the phenomenon of broaching when the vessel is suddenly lagged to the wave. At low speeds, the shock loads are linearized to a certain extent and do not depend on the shape of the hull contours to the extent that for high-speed vessels.

The statistics of accident rate of sea vessels testifies that at an adverse combination extreme loadings from action of waves emergence of dangerous cracks and fractures of vessels in sections of extremities where the calculated bending moments have the minimum values is possible. Such accidents with the exhaustion of the level of structural safety occur with enviable regularity, both on new ships and on ships with significant service life. Accidents are usually explained by an increase in the level of effective stress concentration associated with an increase in the number of intermittent connections while optimizing the weight of the hull a modern marine vessel. The analysis of full-scale experiments and residual damages hulls of the vessels carried out by the authors allowed to reveal a number of essential features in work of designs at action of shock loadings which earlier dropped out of the field of view branch science. The authors, in the work, these features are considered on adequate mathematical models.

Key words: shock loads, side, bottom, cracks, structural safety, loss of stability.

При плавании судна в штормовых условиях на встречном волнении и остаточной зыби сильная килевая качка приводит к оголению днища в оконечностях (см.рис.1). Наблюдается слеминг-удары волн в оголенные участки днища (в носу и корме) приводящие к потере устойчивости судовых

пластин и набора, развитию поперечных трещин, иногда приводящих к разрывам обшивки и перелому корпуса в носовой оконечности. При ударах волн в носовой подзор наблюдается – випинг, сопровождающийся медленно затухающей вибрацией. Под действием периодически

изменяющихся гидродинамических давлений на встречных волнах может начать проявляться незатухающая вибрация, связанная с возбуждением изгибных колебаний корпуса – сприннинг. Гидродинамические давления и общая вибрация корпуса могут инициировать потерю конструктивной безопасности судна по причине нарушения общей и местной прочности. Вероятность повреждения корпуса растет с увеличением скорости судна и уменьшением углубления носом. При плавании в грузу дополнительные нагрузки появляются от накатов волн на палубу. Поэтому, изменение курсовых углов не приводит к уменьшению динамики ударных нагрузок. Наиболее эффективным средством борьбы с ударным взаимодействием является снижение скорости до нескольких узлов, после чего скорость уже не может оказывать влияния на процессы погружения корпуса в воду, а уровень динамических нагрузок в значительной степени линеаризуется и может быть выражен через коэффициенты динамичности.



Рис. 1. Дницевого слеминга при плавании на встречной зыби

В 1990–91 гг. был всплеск внезапной гибели балкеров, связанный с переломом корпуса в районах оконечностей ближе к носовой переборке первого трюма в районе группирования прерывистых связей, погибло 22 судна [1]. Основными причинами были названы недостаточные запасы прочности в районах прерывистых связей оконечностей, которые проявлялись, после середины срока службы судна и в тяжелых погодных условиях [2].

Однако, с учетом снижения коэффициентов запаса (по мере развития правил классификационных обществ) и внедрением в практику проектирования однокритериальной оптимизации поперечного сечения по минимуму веса (с одновременным использованием жестко-пластических моделей и методов теории предельного равновесия с критерием равной предельной прочности) корпуса, суда становятся относительно «более гибкими» (не к середине срока службы, а уже на стадии проектирования). Растут коэффициенты концентрации напряжений в узлах соединений связей корпуса, что вызывает опасное трещинообразование уже через 4–5 лет после начала эксплуатации судна. Учитывая современную тенденцию роста размеров судов, с целью снижения издержек на «эффекте масштаба перевозки», риски перелома корпуса на встречном волнении возрастают многократно. Следует учитывать и тот факт, что корпуса судов строят из сталей повышенной прочности (с малым относительным удлинением) конструктивно, за счет облегчения

корпуса, перекрытия насыщаются неоправданно большим количеством сгруппированных прерывистых связей. Уменьшается относительный размер средней части с продольным набором, при одновременном увеличении комбинированных перекрытий. Соотношение длины к ширине современных крупнотоннажных судов доходит до шести, что само по себе стирает грани между понятиями общей и местной прочности, требуя совершенно иных подходов к понятиям опорного контура. В совокупности, корпус такого судна (как система с «неэкономической ответственностью») уже на стадии проектирования переходит в состояние неустойчивого равновесия (исключаются классические понятия жестких связей) повышая многократно риски потери конструктивной безопасности в поперечных сечениях оконечностей по типу «слабого звена». Образование опасных поперечных трещин в пластинах палубы часто происходит при незначительных эксплуатационных нагрузках вне средней части. Например, на контейнеровозе «MSC MONTEREY» были выявлены опасные поперечные трещины длиной более 1,5 м в настиле палубы перед лобовиной надстройки из-за незатухающей вибрации вызванной дницевым слемингом.

Для проектирования носовой оконечности имеется достаточно большое количество аналитических и численных моделей, описывающих величины и распределение гидродинамических давлений (например, модели расширяющейся пластины Вагнера-Повицкого, расширяющегося диска – Лотова и т. п.). Построенные на этой базе эмпирические формулы, вошедшие в Правила Морского Регистра Судоходства РФ [3] позволяют выбрать достаточно надежные размеры связей в районах до $0,15L$ (расчетной дины корпуса). При этом, району оконечности до $0,25L-0,35L$ в корму от носового перпендикуляра (см. рис. 1) не уделяется должного внимания. Наши натурные эксперименты и оценка остаточных повреждений свидетельствуют о том, что в данном районе имеются три пика динамических ударных давлений перемещающихся на встречу друг другу и складывающихся по амплитуде, что примерно дает коэффициент динамичности 2–2,5 достаточно продолжительный по периоду затухания до 1 с. (а не $0,16-0,20$ с. как полагается до сих пор в технической литературе). Натурные наблюдения позволили связать данное обстоятельство с эффектом названным нами «эффектом квазисерфинга» (замирания и соскальзывания в корму при ударах волн на встречном волнении, как известно явление серфинга описано в литературе только как соскальзывание корпуса судна к подошве волны при плавании на попутной волне соизмеримой с расчетной длиной L). При этом уровень нормальных напряжений в пластинах и продольном наборе может быть довольно значительным и превышать 300 МПа. Процесс истощения конструктивной безопасности развивается также по ранее неизученной сложной бифуркационной схеме.

Внешним признаком, характеризующим отказ конструкции, является резкий излом в пределах двух шпаций и образование гофрировки в настиле палубы и обшивке днища. В месте перелома продольные связи, как правило, отрываются от обшивки. Наши исследования показали, что в момент аварии

реализуется поэтапно следующий механизм разрушения корпуса.

На первом этапе в сварных швах, соединяющих обшивку с продольным набором, образуются трещины. На втором этапе происходит внезапная потеря устойчивости плоской формы изгиба продольных балок и «сбрасывание» нагрузки, сопровождающееся расчленением конструкции корпуса с выводом из работы продольных связей и резким уменьшением площади рабочей части поперечного сечения.

Для определения внешней нагрузки, реализующей описанный выше механизм разрушения корпуса, нами была построена расчетная модель по типу решения известной задачи [4] по «отщеплению лучины». В формулировку этой задачи входит определение силы P , достаточной для раскрытия трещины. Значение величины искомой силы является, по существу, нижней границей оценки несущей способности конструкции в целом.

Рассматриваемая задача решается для случая, когда:

$$h/l_1 \ll 1,0,$$

где h – высота продольной балки; l_1 – длина повреждения.

В этом случае считается, что для изменения потенциальной энергии деформации справедливо асимптотическое равенство:

$$\delta U = \left[\frac{p^2 l_1^2}{2EJ} + \frac{\partial}{\partial l_1} \left(C \frac{p^2 l_1^2}{Eh^2 s} \right) \right] \delta l_1. \quad (1)$$

В нем s – толщина стенки балки; C – постоянная величина.

Используя в качестве критерия, определяющего обеспечение несущей способности балок, энергетический критерий:

$$\delta U = 2\gamma s \delta l_1, \quad (2)$$

где эффективная плотность поверхностной энергии (по Оровану-Ирвину).

Из равенства (1) и (2) получим аналитическую зависимость для вычисления искомого силового параметра:

$$P = sh \frac{h}{l_1} \sqrt{\frac{1}{3} \frac{E\gamma}{h}}. \quad (3)$$

Критическое значение силы $P_{кр}$, при действии которой балка может сломаться, находят из условия равенства действующих изгибных напряжений пределу текучести σ_T . Откуда

$$P_{кр} = \frac{1}{6} sh \frac{h}{l_1} \sigma_T. \quad (4)$$

С использованием формул (3) и (4) можно оценить несущую способность рассматриваемых конструкций и прогнозировать возможный механизм их разрушения.

Действительно, если известно σ_T материала корпусной конструкции, то, сопоставляя действующую нагрузку P с критической $P_{кр}$, можно установить границу, разделяющую области возможных типов их разрушения. Графическое решение этой задачи представлено на рис. 2.

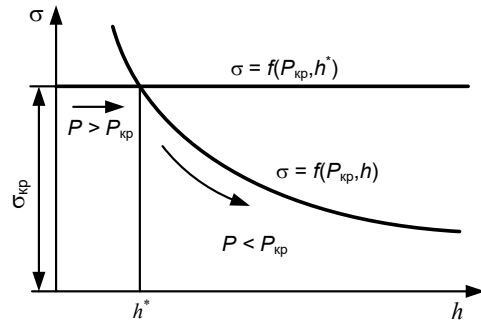


Рис. 2. Определение областей разрушения

Для области, объединяющей балки малой высоты, когда $P > P_{кр}$, реализуется механизм разрушения только за счет нормального напряжения. В этом случае продольные балки деформируются в своей плоскости и воспринимают нагрузку всем своим поперечным сечением совместно с обшивкой. Характер разрушения – образование поперечных трещин.

Для относительно высоких балок продольного набора, характерного для конструкции корпуса речных судов, когда $P < P_{кр}$, будет реализовываться механизм распространения продольной трещины в сварном шве, соединяющем продольный набор с наружной обшивкой. При этом граничным значением высоты продольных балок, разделяющим области, отличающиеся типом разрушения, является высота

$$h^* = 12E\gamma\sigma_T^2. \quad (5)$$

Величина h^* для реальных значений, входящих в (5) параметров, соответствует редко встречающимся 62–70 мм. При значениях $h = h^*$ будет происходить смена характера разрушения конструкции: здесь разрушение за счет действия нормальных напряжений от изгиба уступает место отрыву продольных балок от обшивки за счет действия касательных напряжений. С точки зрения оценки параметров дефектации реальных конструкций балок продольного набора длиной l , имеющих прогиб f , эта область соответствует относительно высоким и коротким балкам с $l_1/h \leq 1,0$. Для такой группы связей следует:

- осуществлять подкрепление стенок балок от заваливания и отслоения их от обшивки;
- исключать применение прерывистых швов в местах соединения балки с обшивкой;
- увеличить длину подкреплений.

Указанные рекомендации признаются классификационными обществами и успешно используются на практике. В частности, ими руководствовались Амурское речное пароходство при выполнении проекта обновления корпусов судов типа «Сормовский» на класс 2SS с полной заменой и модернизацией цилиндрической вставки.

В общем случае рассматриваемую выше задачу можно решать как задачу статической неустойчивости с одним управляющим параметром λ . Этот класс задач позволяют решать модели теории бифуркаций, где для описания возможных форм потери устойчивости системы используют «бифуркацию» складки. Этот случай моделируется локально потенциальной функцией вида:

$$P = h^3 + \lambda(l_1) \times h. \quad (6)$$

Подставляя значения $\lambda(l_1)$ в формулы для P и $P_{кр}$, после преобразования получим выражение, определяющее нижнюю границу:

$$h^* = \frac{1}{3} E \gamma \sigma_T^{-2}. \quad (7)$$

Обычно среди реальных судовых конструкций балки набора такой высоты не встречаются. Скорее всего, такую высоту могут иметь подкрепляющие пластину ребра жесткости, поэтому на практике чаще всего реализуется механизм отрыва балок от

обшивки, причем в зависимости от степени износа сварных швов отрыв набора может происходить даже при нагрузках, значительно меньших предельных.

Учитывая изложенное, для обеспечения конструктивной безопасности можно рекомендовать подкрепление рассматриваемой группы связей кницами в своей плоскости и бракетами в поперечной плоскости.

Подкрепленные связи обеспечат совместную работу набора с подкрепляемой обшивкой и при действии эксплуатационных нагрузок будут осуществлять плоскую форму изгиба вплоть до разрушения.

Литература

1. Барабанов Н. В. Причины, вызывающие гибель навалочников // Повреждения и эксплуатационная надежность судов Дальневосточного бассейна: Сб. тр. Владивосток, 1992. С. 3–33.
2. Ключев В. В. Анализ проблем безопасности мореплавания на российских судах в Азиатском – Тихоокеанском регионе // Проблемы транспорта Дальнего Востока: Пленарные доклады пятой международной научно-практической конференции. – Владивосток, 2003. – С. 32–38.
3. Правила классификации и постройки морских судов ч. II Корпус / ФАУ Российский морской регистр судоходства – СПб.:, 2019, 280 с.
4. Слепян Л. И. Механика трещин. Л. : Судостроение, 1990, 296 с.

References

1. Barabanov N. V. Prichiny, vyzivayushie gibel' navalochnikov [The reasons causing death of bulkers] Povrejenia i ekspluatatsionnaya nadejnost' sudov Dal'nevostochnogo basseyna: Sb. tr. Vladivostok, 1992. S. 3–33.
2. Kluev V. V. Analiz problem bezopasnosti moreplavaniia na rossbyskih sudah v Aziatskom Tihookeanskom regione [The analysis of security of navigation on the Russian vessels in Asian – the Pacific region] Problemyi transporta Dal'nego Vostoka: Plenarnyye dokladyi piatoy mejdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Vladivostok, 2003. S. 32–38.
3. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov ch. II Korpus [Rules of classification and construction of sea vessels of Part II Case] FAU Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva SPb.:, 2019, 280 s.
4. Slepian L. I. Mehanika tresin. [Mechanics of cracks] L. : Sudostroenie, 1990, 296 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Анатольевич Москаленко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теории и устройства судна, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: asmsh@rambler.ru.

Иван Борисович Друзь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов, Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: druz_i_b@mail.ru.

Владислав Михайлович Москаленко, аспирант кафедры Управления морским транспортом Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: vlad2420@mail.ru

Сергей Михайлович Затепакин, Начальник научно-исследовательского отдела управления научно-исследовательской и инновационной деятельности Морской государственной университет им. адм. Г. И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: s.zatepyakin@gmail.com

Mikhail A. Moskalenko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the department of ship theory and arrangement, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: asmsh@rambler.ru.

Ivan B. Druz, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the department of theoretical mechanics and strength of materials, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: druz_i_b@mail.ru.

Vladislav M. Moskalenko, postgraduate student chair of the Sea transport Management Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy e-mail: vlad2420@mail.ru

Sergey M. Zatepyakin, Director of the Research Department of the Directorate of Research and Innovation Activity, Marine State University named after G. I. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya St., 690059, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: s.zatepyakin@gmail.com

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.024

УДК 629.124.74

Расчёты усталостной прочности судовых корпусных конструкций

Г.Т. Казанов¹, М.В. Нагаева^{1, 2}¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Анализ проблем обеспечения надежности, живучести корпусов кораблей и судов, показывает, что дополнительные возможности для повышения точности и достоверности оценок ресурса конструкций на стадиях проектирования и эксплуатации открывает системное наблюдение за состоянием структуры материалов. Информация, получаемая путем обследования материала конструкций на стадиях изготовления, вместе с оперативными данными о состоянии кораблей и судов в эксплуатации позволяет прогнозировать их индивидуальный ресурс. Массовое увеличение количества высоконагруженных, а, следовательно, материалоемких конструкций, поставило проблемы технической диагностики в ряд первоочередных. Наиболее остро разработка методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса стоит для судов, отработавших свой проектный эксплуатационный период. Одновременная замена такой огромной массы выработавших свой срок крупногабаритных конструкций нереальна даже для экономически развитых стран. Поэтому целесообразно ремонтировать подкреплением или восстановлением изношенные конструкции, которые получили в процессе эксплуатации определенную структурную поврежденность конструкционных материалов. Объективность информации о состоянии материала различных элементов конструкции зависит от точности получения и измерения интересующих величин. В статье рассматриваются варианты расчётов усталостной прочности, дополняющие и развивающие методологию прочностных расчётов судовых корпусных конструкций. **Ключевые слова:** надежность, живучесть, системное наблюдение, ресурс, судовые корпусные конструкции, циклическое деформирование, методологии расчёта, напряжённое состояние, концентраторы напряжений, единый подход

Calculations of fatigue strength of ship hull structures

Gennady T. Kazanov¹, Marina V. Nagaeva^{1,2}¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²The Far Eastern State Technical Fishery University

Abstract. Analysis of the problems of ensuring the reliability and stability of ships and ships "housings shows that the system monitoring of the state of the structure of materials opens up additional possibilities for improving the accuracy and reliability of estimates of the resource of structures at the stages of design and operation. Information obtained by examining the material of structures at the stages of manufacture, together with operational data on the state of ships and ships in operation, makes it possible to predict their individual life. The mass increase in the number of highly loaded, and therefore material-intensive structures, has put the problems of technical diagnostics in a number of priority. The most acute development of methods of diagnostics and forecasting of residual life is for ships that have worked out their design operating period. The simultaneous replacement of such a huge mass of long-term large structures is unrealistic even for economically developed countries. Therefore, it is advisable to repair worn structures by reinforcement or restoration, which received certain structural damage of structural materials during operation. The objectivity of information on the state of material of various structural elements depends on the accuracy of obtaining and measuring the quantities of interest. The article discusses the variants of fatigue strength calculations, complementing and developing the methodology of calculations of ship hull structures.

Keywords: reliability, persistence, system surveillance, resource, ship hull structures, cyclical deformation, calculation methodology, tense state, stress concentrators, unified approach

Введение

Оценка ресурса судовых конструкций в условиях циклического деформирования связана с поведением материалов на атомном или молекулярном уровне. В настоящее время поведение конструкционных материалов с такой точки зрения познано не настолько хорошо, чтобы основывать на этих результатах исследований разработку критериев усталостной прочности и методик оценки долговременного использования судовых конструкций, особенно при сложном напряжённом состоянии.

Практика эксплуатации судов показывает, что усталостная долговечность в большей степени определяется низкой вероятностью условий эксплуатации, способствующих развитию

усталостных трещин, чем усилиями в совершенствовании конструкций. Такое мнение об усталостной долговечности судовых корпусных конструкций подтверждается тем, что приходится встречаться с неожиданными случаями исчерпания усталостной долговечности. Повреждения судов имеют катастрофический характер. Считается, что они являются следствием исключительных событий в море во время жестоких штормов и при особых волнах, когда корпус судна испытывает очень большие нагрузки.

Исследования причин аварий показывают, что до сих пор имеют место ошибочные конструктивные решения, и отсутствует контроль за состоянием корпусной стали в эксплуатации.

Наличие особых условий эксплуатации чаще

всего бывает преувеличенным, а низкая усталостная прочность имеет другие причины, многие из которых должны быть учтены при проектировании и эксплуатации судов. В этой связи следует говорить о необходимости дальнейших исследований, совершенствующих количественные оценки и контроль усталостной долговечности судовых корпусных конструкций.

Известно, что физические процессы и особенности их протекания отражают способность материала сопротивляться разрушению и определяют значения параметров, характеризующих процесс зарождения и развития трещин. Следовательно, наиболее полные сведения о состоянии материала можно получить в рамках именно таких наблюдений.

Целесообразно развивать такие подходы, которые учитывают особенности перехода материала конструкций в нерабочее состояние, используя сведения о физических процессах, происходящих в материале под воздействием нагрузок и окружающей среды.

1. Известные результаты исследований циклического нагружения конструкционных сталей

Усталостные трещины корпусных конструкций зарождаются в районе концентраторов напряжений, которыми являются сварные швы, прерывистые связи и жёсткие точки. По судостроительным сталям, работающим в составе корпусных конструкций в условиях сложного напряжённого состояния, работ, связанных с разработкой энергетических критериев усталостного разрушения металлов, практически нет [1]. Известные результаты исследований распространяются только на случай простого одноосного циклического нагружения некоторых машиностроительных сталей при тщательно контролируемых лабораторных условиях. Кроме того, учитывая масштабы предпринятых усилий, полученные результаты, даже появились мнения о маловероятном достижении существенного прогресса в обозримом будущем в исследованиях физическими методами процессов циклического деформирования.

В этой связи, можно утверждать, что теоретические и экспериментальные исследования физическими методами, в частности, с использованием термодинамической концепции усталости, направленные на формирование критериев усталостной прочности, разработку методики оценки ресурса судовых конструкций при сложных видах напряжённого состояния, являются актуальными [1].

В связи с изучением проблемы усталости широкое развитие получили исследования переменных нагрузок, действующих на корпуса судов в условиях волнения. Значительно расширены возможности расчетного определения и статистического описания напряжённости конструкций в процессе эксплуатации [5]. В то же время в формирующейся методологии расчёта и представлениях о критериях нормирования усталостной прочности затруднён прогноз кинетики развития усталостного разрушения, продолжительность которого является важной характеристикой ресурсных возможностей

конструкций. Циклическое деформирование материала в районах концентраторов напряжений простейших образцов и сложных конструктивных узлов отождествляется, что не всегда допустимо. Не учитывается влияние внутренних сварочных напряжений и другие технологические факторы реальных конструкций [1, 2].

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при применении экспериментально-расчётного способа определения параметров усталостной прочности конструктивных узлов, развитого и широко используемого в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [2, 5]. Способ основывается на непосредственном применении результатов усталостных испытаний полунатурных и натуральных конструкций, включающих типовые узлы, рассматриваемые при расчётах усталостной долговечности. Работы в этом направлении продолжаются, но они являются дорогостоящими, материалоемкими и энергоёмкими.

Для дальнейшего развития и совершенствования методологии оценки и обеспечения усталостной прочности судовых конструкций необходимо совершенствование теории расчёта накопления и развития усталостных повреждений, что определяет направленность всех исследований в работе [1] и других [2 – 6].

Результаты работы [1] использованы по проблемам методического обеспечения расчётного проектирования, оценки повреждённости и ресурса судовых конструкций в условиях циклического нагружения.

Механизм циклического деформирования материала рассмотрен с позиций термодинамики необратимых процессов, что позволяет математически моделировать процесс усталости материала при любых видах напряжённого состояния, в том числе и не воспроизводимых экспериментально.

Анализом известных моделей вязкоупругого тела установлено, что требованиям простого и полного моделирования процессов циклического деформирования отвечает модель Кельвина. Она является оптимальной моделью с физической и математической точек зрения. Обоснован выбор её параметров на основе экспериментальных данных, приведены теоретические исследования закономерностей упругопластического деформирования судостроительных сталей в условиях многоциклового усталости.

Выявлены аналогии со статическим нагружением, что позволило математически сформулировать критерии циклической прочности судостроительных сталей для любой комбинации главных напряжений при их синфазном и противофазном стационарном синусоидальном изменении.

Составлены формулы, отвечающие термодинамическим подходам в рассмотрении циклической прочности металлов. Показано, что они представляют собой разновидности математического выражения гипотезы линейного суммирования повреждения Пальмгрена-Майнера.

Сформулированы новые варианты расчётов усталостной прочности, дополняющие и развивающие методологию расчётов судовых и других конструкций в условиях циклического нагружения.

Ссылаясь на работу Петина С.В., отмечается, что «использование напряжений или деформаций в качестве параметра, характеризующего усталостные повреждения, ведёт к формулировке условных критериев разрушения».

Действительно вероятностные модели накопления повреждений содержат неопределённость, которая зависит от экспериментального материала, положенного в основу модели. Вместе с тем все модели обусловлены нашими представлениями о сложных явлениях, и без условностей их рассмотреть невозможно.

Модели используются в формировании методик проектирования заданных уровней безопасности и надёжности. При этом стремятся обеспечить минимум стоимости, организацию оптимального обслуживания конструкций в эксплуатации. Поэтому следует приветствовать любую модель, которая помогает в достижении этих целей, будь она детерминированная, вероятностная феноменологическая или основанная на фундаментальных физических законах.

Методику расчётного определения эффективных коэффициентов концентрации напряжений, предлагаемую в работе [1], целесообразно использовать не в прямом предназначении, а для определения коэффициентов чувствительности материалов к усталостным повреждениям. Это позволит получить их более общую характеристику при циклическом деформировании, каким является упомянутый коэффициент. Также в этом случае к оценкам циклического деформирования материалов активно привлекается вся имеющаяся и вновь поступающая информация о теоретических коэффициентах концентрации напряжений и конкретных видах напряжённого состояния в точке [1].

Выполненные исследования развивают теорию упругопластического деформирования материалов и, в частности, судостроительных сталей в условиях циклического деформирования. Основное внимание уделено учёту вида напряжённого состояния в оценках усталостной прочности судостроительных сталей.

Осуществлена разработка единого подхода к оценке долговечности конструкций при любом виде напряжённого состояния на базе сформулированных в работе критериев циклической прочности. В результате резко возрастает роль численных и аналитических методов в описании напряжённого состояния конструкций, так как информация о напряжениях в конструкции является основой расчёта усталостной прочности.

Использование термодинамической концепции циклической прочности позволяет математически моделировать процесс усталости материала при любых, даже не воспроизводимых экспериментально, видах напряжённого состояния. Зависимости, полученные на основании этой концепции, подтверждают гипотезу линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера,

являются её разновидностями на физическом уровне представления циклического деформирования.

Результаты, полученные в работе [1], могут использоваться при выполнении проверочных и проектировочных расчётов циклической прочности судовых и других конструкций. Они могут учитываться на стадиях проектирования и эксплуатации, а также в создании практических методов диагностики повреждённости конструкций судового корпуса и, соответственно, наработанного и остаточного ресурсов.

Получены результаты, позволяющие по сведениям о напряжённом состоянии конструкций решить важную научно-техническую проблему методического обеспечения расчётных оценок ресурса судовых и других конструкций в условиях циклического нагружения.

Научные и практические результаты имеют важное значение для системного подхода обеспечения безопасности конструкций, работающих в условиях циклического нагружения. Они позволяют расчёты усталостной прочности судовых конструкций перевести из состояния относительных оценок к физически более обоснованным критериям, учитывающим реальные процессы циклического деформирования материалов.

2. Дополнение расчётов усталостной прочности корпусов кораблей и судов эффективными информативными параметрами

Понятия коэрцитивной силы, твердости, структурного состояния стали в значительной мере позволяют преодолеть исторически сложившиеся несовершенства средств обеспечения надёжности, живучести в проектировании, эксплуатации корпусов кораблей и судов. Подтверждением этому являются нередкие, необъяснимые аварийные разрушения, происходящие непосредственно после выполненной дефектоскопии вследствие ничем и никак не предвиденного усталостного разрушения после накопления в корпусной стали определенного уровня структурной поврежденности.

Главное достоинство таких подходов в совершенствовании средств контроля технического состояния корпусов кораблей и судов заключается в возможности оперативной оценки механических характеристик стали, не выводя корабль из строя и не вырезая из его корпуса образцов. Тем самым реализуется объединение средств обеспечения надёжности, живучести в проектировании, эксплуатации кораблей и судов, выводе их на новый уровень эффективности.

Появление неконтактного минного и торпедного оружия, а затем магнитных обнаружителей (магнитометров) подводных лодок в подводном положении, реагирующих на магнитное поле корабля, привело к разработке и созданию методов и средств защиты кораблей. Основным методом пассивной защиты является размагничивание кораблей (рис. 1, 2).



Рис. 1. Размагничивание с помощью обмоток, накладываемых на корабль временно



Рис. 2. Размагничивание обмотками вне корабля, на грунте или расположенными на корабле стационарно

Суть размагничивания или электромагнитной обработки (ЭМО) заключается в создании

определенным образом магнитного поля, обратного по знаку полю корабля. Процесс такого искусственного уменьшения магнитного поля корабля дает представление о напряженности H или коэрцитивной силе, которая увеличивается по мере истощения ресурса металла или его деградации.

Коэрцитиметрическое диагностирование [5], как и диагностирование посредством накладных листов [6], выполняющих функции «свидетелей», осуществляют на действующих конструкциях. Величина коэрцитивной силы контролируемого металла зависит от его текущего состояния.

Поэтому из всех методов неразрушающего контроля, рассматриваемые методы наиболее близко отображают механическое состояние материала реальной конструкции. Поправки в прочностные расчеты на основе указанных методов сделают такие расчеты наиболее адекватными истинному текущему состоянию корпусной стали.

Предлагаемые дополнения к расчетам усталостной прочности корпусов кораблей и судов продолжают реализацию объединения средств обеспечения надежности, живучести в проектировании, эксплуатации корпусов кораблей и судов, и вывод их на новый уровень эффективности.

Заключение

Главное достоинство рассмотренных подходов в совершенствовании средств контроля технического состояния корпусов кораблей и судов заключается в возможности оперативной оценки механических характеристик стали. Все более осязаемая практическая неполнота классических средств формирования и поддержания технического состояния корпусов кораблей и судов дополняется эффективными информативными параметрами. Создается реальная возможность перехода к стратегии обоснованных решений задач в проектировании корпусов кораблей и судов, своевременных ремонтных, модернизационных мероприятий, коррекции эксплуатационных режимов.

Литература

- Аносов А.П. Оценка ресурса судовых конструкций в условиях циклического нагружения: диссертация доктора технических наук. – Владивосток: ДВГТУ, 2001. – 371 с.
- Антоненко С.В. Восстановление общей продольной прочности танкера «Владимир Колечицкий» методом подкрепления главной палубы / С.В. Антоненко [и др.] // Технология судоремонта. – 2007. – № 1. – С. 5–13.
- Титов М.А. Разработка мер, повышающих безопасность эксплуатации корпусов кораблей и судов // Конкурс лучших научно-исследовательских работ в Военно-Морском Флоте; научный руководитель Г.Т. Казанов – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова», 2011. – 31 с.
- Матюхин Г.В. Оценка ресурса сварных конструкций из феррито-перлитных сталей: монография / Г.В. Матюхин. – Владивосток: ДВГТУ, 2001. – 202 с.
- Безлюдько Г.Я. Главные особенности метода коэрцитивной силы как нового уровня эффективности и культуры слежения за усталостью и ресурсом металлоконструкций и оборудования / Г.Я. Безлюдько [и др.] // В мире неразрушающего контроля – 2014. – № 3 (65). – С. 67–73.
- Казанов Г.Т. Концентрация напряжений и другие особенности напряжённого состояния судовых корпусных конструкций: монография / Г.Т. Казанов, В.В. Новиков, Г.П. Турмов; [науч. ред. Г.Ю. Илларионов]. – Владивосток: Дальневост. Федерал. Ун-т, 2014. – 178 с.

References

10. Anosov, A.P. Ocenka resursa sudovyh konstrukcii v usloviyah ciklicheskogo nagruzeniy: dissertaciy doctora tehniceskikh nauk [Evaluation of ship structures life under cyclic loading conditions]. Vladivostok, DVG TU, 2001, 371 p.
11. Antonenko, S.V. & dr. (2007). Vosstanovlenie obshei prodolnoi prochnosti tankera Vladimir Kolehickii metodom podkrepleniya glavnoi paluby. Tekhnologiya sudoremonta [Restoration of the total longitudinal strength of the tanker "Vladimir Kolehitsky" by the method of reinforcement of the main deck]. 1, 5–13.
12. Titov, M.A. (2011). Razrabotka mer, povyshayushchih bezopasnost ekspluatatsii korpusov korablei I sudov. Konkurs luchix nauchno-issledovatel'skix rabot v voenno-morskom flote [Development of measures increasing the safety of ship and ship hull operation]. Vladivostok, TOVMI imeni S.O. Makarova. VUNC VMF VMA imeni N.G. Kuznetsova, 31 p.
13. Matokhin, G.V. Ocenka resursa svarnyh konstrukcii iz ferrito-perlitnyh stalei. Monografiya [Evaluation of the resource of welded structures made of ferrite-pearlite steels]. Vladivostok: DVG TU, 2001, 202 p.
14. Besludko, G.J. & dr. (2014). Glavnye osobennosti metoda koercitivnoi sily kak novogo urovnya effektivnosti I kultury slegeniya za ustalostiy I resursom metallokonstrukcii I oborudovaniya. V mire nerazrushayushchego kontrolya [The main features of the method of coercive force as a new level of efficiency and culture of tracking fatigue and resource of metal structures and equipment]. 3(65), 67–73.
15. Kazanov, G.T., Novikov, V.V., Turmov, G.P. Koncentraciya napryazhenii I drugie osobennosti napryazhennogo sostoyaniya sudovyh korpusnyh konstrukcii. Monografiya [Stress concentration and other features of stressed state of ship hull structures]. Vladivostok, DVFU, 4, 178 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Тимофеевич Казанов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и общетехнических дисциплин, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: kazgentim1@mail.ru

Gennady T. Kazanov, Associate professor, Ph.D. (Eng.), Associate professor of the Department of physics and general technical disciplines, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: kazgentim1@mail.ru

Марина Витальевна Нагаева, старший преподаватель кафедры «Инженерные дисциплины», Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б; заведующая кабинетом аэрогидродинамики кафедры физики и общетехнических дисциплин, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: NagaevaMV@mail.ru

Marina V. Nagaeva, Senior lecturer of Department of Engineering disciplines, The Far Eastern State Technical Fishery University, Lugovaya, 52b, Vladivostok 690087, Russian Federation, chief cabinet of the Department of physics and general technical disciplines, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: NagaevaMV@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.058
УДК 629.124.9.039.001.63

Амфибийные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для освоения арктических шельфовых побережий

А.И. Азовцев¹, С.А. Огай¹, М.В. Войлошников¹, В.А. Петров¹, О.В. Москаленко²

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

²Дальневосточное управление государственного морского надзора
Федеральной службы по надзору в сфере транспорта

Аннотация. Амфибийные вездеходы на воздухоопорных гусеницах оказывают минимальное воздействие на поверхность грунта в арктической тундре, что является большим преимуществом этого типа транспортных средств, относя к их числу вездеходы грузоподъемностью до 150 т. Воздухоопорная гусеница конструктивно является промышленной конвейерной лентой, снабженной с наружной стороны надувными пневматическими плечами большого диаметра. Воздушная подушка используется взамен металлической подвески. Большая площадь контакта пневматических плеч с поверхностью обеспечивает проходимость вездехода по слабому грунту, снегу или болоту в летнее время без повреждения тундрового дерна. Вездеходы на воздухоопорных гусеницах могут преодолевать уклон в 20 градусов, а также преодолевать береговой уклон. При форсировании пологих склонов вездеходы на воздухоопорных гусеницах в полтора – два раза более эффективны, чем традиционные амфибии на воздушной подушке. Применение универсальных амфибийных транспортных средств на воздухоопорных гусеницах (ТСВГ) необходимо для освоения береговых территорий арктического шельфа.

Ключевые слова: амфибия, вездеход, воздухоопорная гусеница, площадь контакта опоры, пневматическая плеча (пневмоплеча), протяженность контакта опоры, площадь потери давления, воздухонагнетатель, экологичность, нагрузка на грунт, тундровый грунт, разрушение дерна.

Amphibious all-terrain vehicles with the air-cushion caterpillars for the operation on the Arctic waterfronts

Anatoliy I. Azovtsev¹, Sergei A. Ogai¹, Michael V. Voyloshnikov¹, Vladimir A. Petrov¹, Oleg V. Moskalenko²

¹Maritime state university named Admiral Nevelskoi

²Far East Directorate for State of Maritime Supervision of Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport

Abstract. Amphibious all-terrain vehicle with the air-cushion caterpillars have minimal impact on the surface of ground in the arctic tundra, and this is a great advantage of this type of vehicles, referring to them the 150 t load capacity as well. The air-cushion caterpillar is manufactured conveyer track with the inflated pneumatic supports of large diameter on the outer side of the track. The air-cushion is applied instead of the mechanical suspension rolls. The large area of pneumatic supports contact provides the passability of the vehicle in the weak ground, or snow or the marshland without the damaging of tundra turf in summer. The vehicles with the air-cushion caterpillars can go on the 20 degree slope as well as on the coast slope. For the overcoming of small slopes the vehicles with the air-cushion caterpillars are of 1.5 to 2 times more effective than that of the usual air-cushion boats. The use of universal amphibious all-terrain vehicles with the air-cushion caterpillars (VACC) is of the demand for Arctic offshore coastal territories development.

Key words: amphibious vehicle, all-road vehicle, air-cushion caterpillar, area of supports contact, pneumatic support, length of supports contact, air flow area, air blower, ecology, load on the ground, tundra ground, sod destruction

Введение

Устройство воздухоопорной гусеницы грузового амфибийного транспортного средства показано на схеме (Рис. 1).

Воздушная подушка создается в полости между днищем понтона и нижней ветвью гусеницы в пространстве, ограниченном вертикальными скегами, совмещенными с боковыми краями гусеницы с небольшим зазором. Край гусеничной ленты с предельно малым зазором движется вдоль вертикальных гладких поверхностей боковых скегов.

Для подъема скегов над уровнем грунта (т.е. для обеспечения клиренса) на протяжении опорной поверхности на грунте установлены надувные плечи (пневматические), изготовленные из легкого и надежного эластичного материала, закрепленные на наружной поверхности гусеничной ленты. Пневматические плечи вдоль гусеничной ленты закреплены плотно друг к другу для снижения давления на грунт.

Внутри гусеницы выше воздушной подушки расположен водонепроницаемый понтон, в котором находится механическое оборудование движения и воздухонагнетатель.

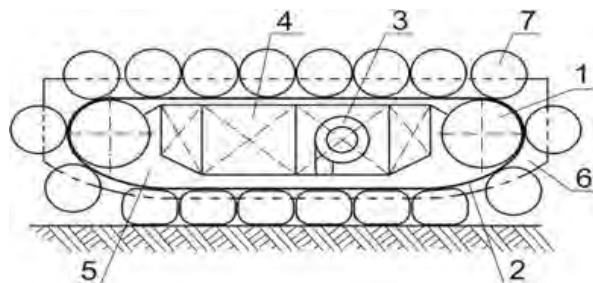


Рис. 1. Совмещенная схема устройства воздухоопорной гусеницы и скега: 1– барабан; 2– гусеничная лента; 3– воздухонагнетатель; 4– понтон; 5– полость воздушной подушки; 6– бортовые скеги; 7– пневматические плечи

Понтон внутри гусеницы опирается на избыточное давление в воздушной подушке, которое

распределено по днищу понтона. Рабочей стороной полости, в которой поддерживается избыточное давление служит гибкая лента (гусеница), которая заведена с некоторым избытком длины на барабаны в носовой и кормовой оконечностях понтона.

Необходимое давление в нижней полости гусеницы поддерживается постоянно работающим воздухонагнетателем, восполняющим утечки воздуха через зазоры между боковыми краями ленты и боковыми стенками скегов.

Малая ширина этих зазоров при их большой длине характеризует площадь истечения воздуха из полости гусеницы, и, соответственно, определяет затраты энергии на поддержание давления, что должно приниматься во внимание на этапе теоретических исследований и при проектировании.

Применение скользящих уплотнений по краям гусеничной ленты снижает утечки воздуха.

Площадь зазора для различных типов уплотнений по краям гусеничной ленты и без уплотнений служит важным элементом при оценке расхода энергии для поддержания давления воздуха. Эта площадь может быть найдена по косвенным оценкам с использованием замера давления в емкости с заданной площадью истечения.

Пневматические плиты прижимаются к грунту избыточным давлением в воздушной подушке. При этом формируется большое контактное пятно на грунте, благодаря чему характерно низкое давление на грунт, обеспечивающее сохранность (неповреждаемость) дернины тундры.

Необходимые характеристики воздухоопорной гусеницы как пропульсивного устройства можно обеспечить благодаря существенной выпуклости нижней ветви гусеницы и благодаря соответствующим размерам пневматических плит, а также, для этой цели скеги подняты выше уровня воды. Нижняя ветвь гусеницы обеспечивает плавучесть транспортного средства и служит амфибийным пропульсивным устройством.

Воздухоопорные гусеницы могут использоваться в составе амфибийных транспортных средств различного назначения и совмещают преимущества воздушной подушки и гусеничного движителя.

1. Устройство транспортного средства на воздухоопорных гусеницах

Схема общего расположения обычного гусеничного вездехода использована в исследовательском проектировании амфибийного вездехода.

Общий вид амфибийного транспортного средства грузоподъемностью 20 т (ТСВГ-20) на воздухоопорных гусеницах показан на схеме (Рис. 2).

Между воздухоопорными гусеницами расположена грузовая платформа.

Рубки управления находятся в носовых оконечностях гусеничных понтонов и они прикрывают верхние ветви гусениц от набегающего воздушного потока.

Одна из рубок используется для навигационного управления, а вторая – для управления грузовыми операциями.

Схемы общего расположения транспортных средств на воздухоопорных гусеницах могут существенно различаться по характеристике

расположения соединительного моста (корпуса) по отношению к поверхности воды.

В разработанных проектных предложениях корпуса вездеходов конструктивно подняты выше уровня воды.



Рис. 2. Общее расположение вездехода ТСВГ-20 грузоподъемностью 20 т

При определении размеров пневматических плит рассчитывается сила плавучести погруженной части воздухоопорной гусеницы, которая соответствует также нагрузке на грунт и весу транспортного средства с грузом.

2. Преимущества амфибийного ТСВГ

Большая часть территорий в Арктике и на Дальнем Востоке имеет пересеченный рельеф. На этих территориях транспортные средства на воздухоопорных гусеницах могут эксплуатироваться надёжно.

ТСВГ по многим показателям превзойдут известные амфибийные транспортные средства. Воздухоопорная гусеница реализует эффективный способ снижения сопротивления воды за счет движения смоченной поверхности гусеницы по направлению набегающего потока, что уменьшает требуемую мощность силовой установки в сравнении с амфибийными СВП и глиссирующими судами.

По сравнению с аналогами экологические характеристики ТСВГ по давлению дадут существенные преимущества ввиду малого влияния воздухоопорных гусениц на грунт, что особенно важно в тундре. В отличие от колесной внедорожной техники и от вездеходов на традиционных гусеницах, которые разрушают поверхность тундры, транспортные средства на воздухоопорных гусеницах способны преодолевать переувлажненные склоны без разрушения дерна и без образования колеи. Заполнение такой колеи водой делает невозможным возвращение обычных вездеходов в пункт отправления по тому же пути.

При движении по суше гусеничный движитель ТСВГ обеспечивает приблизительно в полтора раза большую эффективность, чем КПД воздушного винта амфибийных СВП.

Носовая часть воздухоопорной гусеницы обеспечивает хорошую всхожесть на волну, минимальные потери скорости и более плавную килевую качку по сравнению с судами на воздушной подушке.

Испытания, проведенные на самоходной модели ТСВГ показали, что:

– воздухоопорные гусеницы являются плавучим амфибийным внедорожным движителем, плавучесть, которого равна опорной реакции грунта,

мореходность обеспечивается при волнении моря до 4 баллов, а также в условиях прибойя;

- транспортное средство надежно действует в битом льду, обеспечивается выход на поверхность льда и движение одной гусеницей по льду, когда вторая гусеница находится в воде;

- препятствия в виде выступов и трещин преодолеваются надежно, обеспечивается подъем на затяжные склоны и движение при боковом уклоне;

- плавность движения ТСВГ характерна во льдах, на валунах, кочках и на небольших торосах, при ходе по пням лесосеки, что позволяет достигать скорости до $30 \div 40$ км/ч. по такому бездорожью;

- обеспечивается надежность движения в снегах и болотах любой категории.

Планируется возможность эффективного использования ТСВГ при постройке сооружений на шельфе, включая нефтяные и газовые трубопроводы, буровые платформы, а также амфибийные перевозки грузов по морю и по суше, включая преодоление склонов на суше, и использование для развертывания других морских промышленных комплексов, работающих на шельфе, под водой и подо льдом.

Использование амфибийного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах может осуществляться круглогодично и всепогодно для осуществления спасательных операций и обеспечения безопасности судоходства по Северному морскому пути, на замерзающем шельфе, в прибойных зонах акваторий и в тундре.

Ученые Морского государственного университета и Дальневосточного технического университета рыбной промышленности при выполнении работ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники в период 2009–2016 годов» исследовали эффективность создания глассирующих транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для обеспечения прибрежного морского рыболовства.

Высокая эксплуатационная скорость ТСВГ в глассирующем режиме существенно сокращает длительность перехода из пункта базирования к месту лова и длительность возврата. Снижается транспортная составляющая в стоимости улова.

Демонстрационные испытания действующей модели на выставке «СПЕЦТРАНС» удостоились золотой медали за создание нового принципа движения - на воздухоопорных гусеницах.

3. Снижение нагрузки на почву в тундре путем увеличения длины контактного пятна пневматической плиты

Амфибийный вездеходы на воздухоопорных гусеницах разрабатываются для различных видов применения при комплексном освоении побережий и шельфа. Эффект снижения нагрузки на почву в тундре достигается максимальным увеличением длины контактных пятен пневматических плит.

Задача ставится с учетом информации о вреде природе причиняемом разрушением дерна в тундре колесными и гусеничными вездеходами, широко используемыми при освоении Арктики.

На основе анализа длины контактных пятен пневматических плит, применённых на экспериментальной модели вездеходного транспортного средства грузоподъемностью 20 т,

была получена зависимость длины контактного пятна от формы торцевых частей пневматических плит. Установлено, что упрощенная форма торцевой части способствует максимальному увеличению длины контактного пятна и, соответственно, площади контакта с почвой, при которой снижается нагрузка на почву.

4. Сопоставление контактных пятен пневматических плит, имеющих сферические и торообразные торцевые части

Задача снижения давления на почву путем увеличения контактных пятен пневматических плит в условиях ограничения их габаритных размеров шириной гусеничной ленты решается сопоставительным исследованием пневматических плит со сферическими и торообразными торцевыми частями.

Общий разрез пневматической плиты со сферическими торцами радиусом R показана на схеме (Рис. 3 а). Прижатие пневматической плиты к поверхности грунта дает небольшое увеличение контактного пятна в пределах размера R .

Основная часть площади контактного пятна формируется цилиндрической вставкой между торцами пневматической плиты.

Увеличение длины цилиндрической вставки путем снижения размера торцев достигает путем использования торообразной формы торцев, которые соединены внутренней центральной стяжкой, как это показано на схеме (Рис. 3 б). Тороидальный радиус торцев r_1 в два раза меньше, чем сферический радиус обыкновенной пневматической плиты R . Это увеличивает длину цилиндрической вставки на размер удвоенного тороидального радиуса $2 \times r_1$, или на размер радиуса сферического торца R .

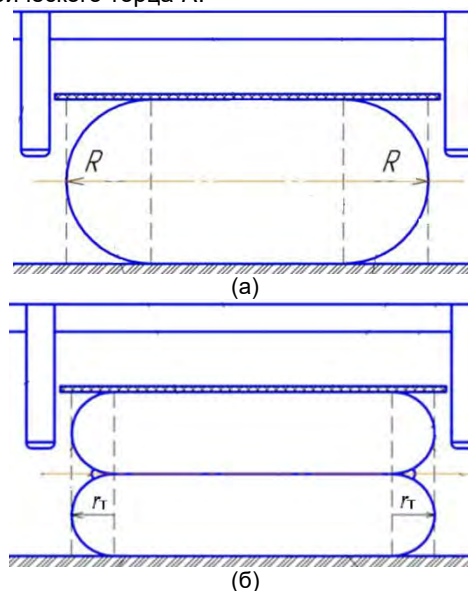


Рис. 3. Устройство пневматической плиты: а) со сферическим торцом; б) с торообразным торцом

Пневматические плиты с подобными тороидальными торцами установлены на полунатурной самоходной модели транспортного средства на воздухоопорных гусеницах (Рис. 4).

Устройство экспериментальной установки для исследования контактных пятен пневматических плит, когда они прижаты к плоскости и с учетом их взаимного контакта показана на фотографии (Рис. 5).

Наблюдаемое увеличение площади контакта пневматических плит при замене сферических торцов на торообразные является одним из результатов при поиске конструктивных решений для увеличения длины цилиндрической вставки пневматической плиты путем снижения выпуклости торцов плиты.

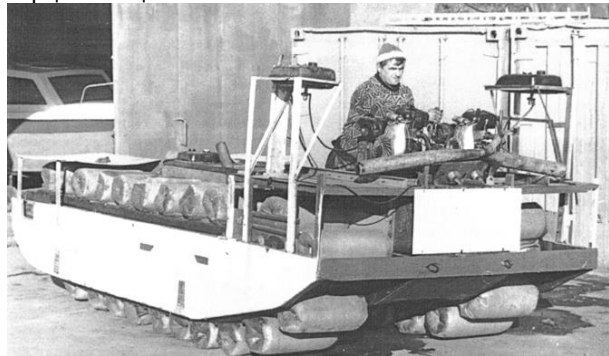


Рис. 4. Самоходная модель амфибийного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах

Технологически можно уменьшить выпуклость плоских торцов до минимальной величины путем применения внутри пневмоплиты множества стяжек. Однако такое решение существенно усложнило бы конструкцию пневматических плит.



Рис. 5. Экспериментальная установка для исследования контактного пятна

Экспериментальные исследования деформации пневматической плиты с плоскими торцами показывает, что данный вариант характеризуется очень малой выпуклостью при отсутствии внутренних стяжек, что показано на схеме (Рис. 6).

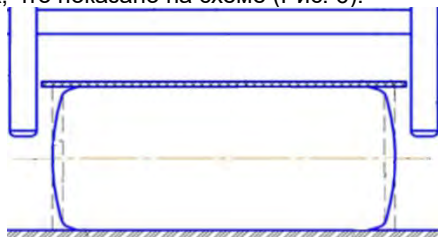


Рис. 6. Устройство пневматической плиты с плоскими торцами

Сравнение форм контактных поверхностей пневматических плит (Рис. 7 а и б) показывает

увеличение площади контакта при использовании плоских торцов и увеличение объема пневматических плит, при котором также увеличивается их плавучесть.

При ширине гусеничной ленты равной $B=2,5$ м и при диаметре пневматических плит $\varnothing=1,2$ м, при радиусе сферического торца $r_s=0,6$ м, а также при тороидальном радиусе торца $r_t=0,3$ м, предполагая, что габаритная длина пневматической плиты равна ширине гусеничной ленты длина цилиндрической вставки в варианте сферических торцов равна $l = B - 2 \times r_s = 2,5 - 2 \times 0,6 = 1,3$ м; а для тороидальной формы торцов $l = B - 2 \times r_t = 2,5 - 2 \times 0,3 = 1,9$ м.

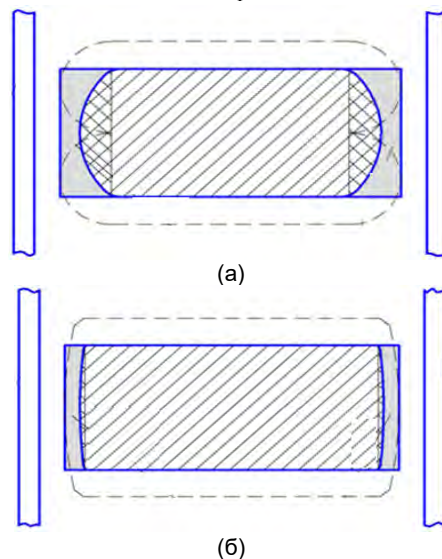


Рис. 7 Форма контактного пятна пневматической плиты: а) с тороидальными торцами; б) с плоскими торцами

При прижимании пневматической плиты к грунту плоский торец выгибается в 2,66 раза меньше, чем торец тороидальной формы, и в 5,32 раза меньше, чем выпучивание сферического торца.

Использование торцов тороидальной формы увеличивает длину цилиндрической вставки в 1,46 раза, соответственно увеличивается площадь контакта с грунтом и снижается давление на грунт.

Экспериментальные исследования деформации пневматической плиты с плоскими торцами подтверждает незначительная выпуклость торцов при отсутствии внутренних стяжек в пневматической плите.

5. Усовершенствование конструкции пневматических плит с использованием внутренней переборки

Рабочая форма пневматической плиты (служащая, также, грунтозацепом при движении амфибийного транспортного средства по бездорожью) достигается за счет необходимого внутреннего давления (Рис. 8 а).

Этим создаются необходимые свойства пневматической плиты при движении по грунту при погружении пневматических плит и гусеницы в воду.

Если нарушена герметичность может произойти потеря давления внутри пневматической плиты. При этом возрастет нагрузка на соседние

пневматические плиты и снижается плавучесть воздухоопорной гусеницы.

За счет центробежных сил, действующих при проходе барабана, габаритный размер поврежденной пневматической плиты возрастает в 1,57 раза в радиальном направлении по сравнению с нормальным размером пневматической плиты, что показано на схеме (Рис. 9 а). Возможно разрушение поврежденной пневматической плиты кожухом ограждения верхней ветви воздухоопорной гусеницы. Это снижает сохранность поврежденной пневматической плиты.

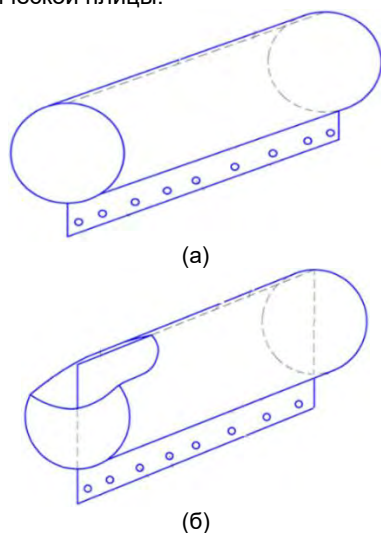


Рис. 8. Форма пневматической плиты в разрезе: а) с плоскими торцами; б) с продольной внутренней перегородкой

Существенное увеличение надежности пневматической плиты при возможном повреждении может быть получено делением внутреннего объема пневматической плиты на герметичные части. Это усовершенствование конструкции пневматической плиты показано на схеме (Рис. 9 б). Внутренняя переборка герметично присоединена по периметру пневматической плиты.

Если одна из герметичных полостей пневматической плиты будет повреждена, то вторая сохранит герметичность и изменит форму, что показано на схеме (Рис. 10). Размер части поврежденной пневматической плиты, остающейся герметичной, на 20 % меньше первоначального диаметра, это существенно понизит работоспособность пневматической плиты. Переборки также снижают выпуклость торцов пневматической плиты.

Когда установлена гибкая продольная переборка (Рис. 8 б), соединяющая верхнюю и нижнюю поверхности пневматической плиты, то потеря воздуха из поврежденной части пневматической плиты приводит к увеличению радиального размера в 1,285 раз (Рис. 9 б) при проходе барабана. Это соответствует 2-кратному снижению избытка размера поврежденной плиты при проходе барабана по сравнению с избытком размера поврежденной плиты без переборки. Поврежденная плита без переборки полностью теряет опорные свойства на суше и плавучесть в воде.

Недостаточный опыт по определению размера зазора между краями воздухоопорной гусеницы и

стенками скегов, ограничивающих гусеницу служит основанием для отказа от более точных оценок эффекта применения плоских торцов воздухоопорных плит без внутренних перегородок.

Частично эта идея снизить выпуклость плоского торца пневматической плиты была осуществлена. Внутренняя связь была выполнена в виде эластичной перегородки, имеющей длину, равную длине цилиндрической вставки.

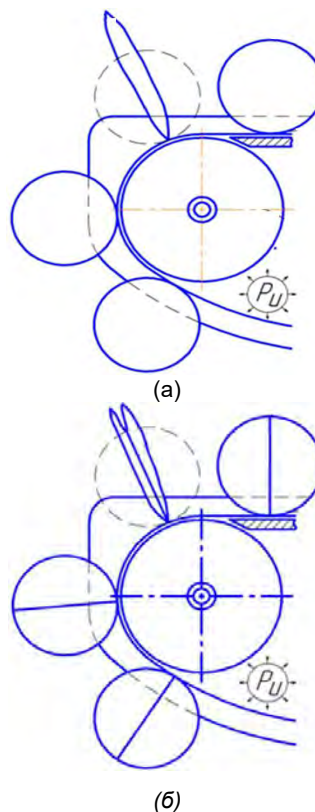


Рис. 9. Форма поврежденной пневматической плиты под действием центробежных сил при проходе барабана: а) в варианте без внутренней переборки; б) в варианте с установленной внутренней переборки

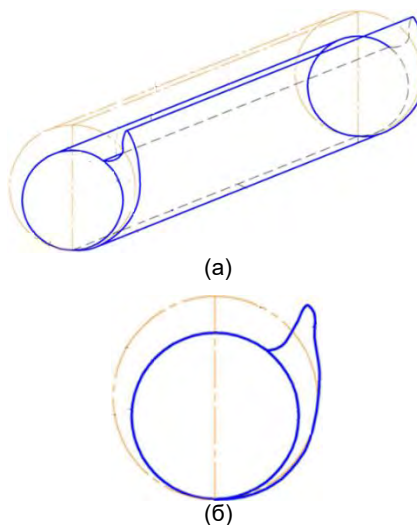


Рис. 10. Поврежденная пневматическая плита в разрезе, включающая две герметичных части, когда одна часть повреждена

Достигнутое снижение концевой изгиба успешно совмещено с повышением надежности пневматической плиты, если одна или две ее герметичных части будут проколоты. Предполагаемое некоторое усложнение конструкции плиты способствует улучшению эксплуатационных качеств воздухоопорной гусеницы.

Если более, чем одна перегородка устанавливается внутри пневматической плиты, то количество ее герметичных отсеков увеличивается и надежность сохранения герметичности улучшается, сохраняя частично обеспечение опирания на грунт и плавучесть на воде.

6. Техника экспериментального определения площади истечения воздуха из воздушной подушки гусеницы

Целью эксперимента по использованию воздухонагнетателя на действующей модели выступает разработка зависимостей площади истечения воздуха из внутренней полости (воздушной подушки), огражденной эластичной лентой воздухоопорной гусеницы и скегами.

Метод определения площади истечения воздуха из воздушной подушки основан на применении косвенных измерений с применением моделей.

Для создания требуемого давления в воздушной подушке внутри гусеницы применяется высокоскоростной осевой нагнетатель с электрическим приводом. Экспериментальные исследования подтвердили применимость подобных воздухонагнетателей.

Требуемое давление в полости воздушной подушки, ограниченной нижней ветвью воздухоопорной гусеницы поддерживается работающим нагнетателем воздуха, компенсирующим утечки воздуха через зазоры между краями гусеничной ленты и стенками скегов.

Зазоры малой ширины при их большой протяженности определяют площадь утечки воздуха из полости гусеницы, и, соответственно, существенный расход энергии для поддержания давления, что подлежит учету при теоретических исследованиях и проектных обоснованиях.

Использование скользящих уплотнений по краям гусеничной ленты сокращает расход энергии и потери воздуха.

Площадь зазора для различных вариантов скользящих уплотнения и без них служит важным элементом при оценке энергозатрат для поддержания давления в воздушной подушке. Эта площадь находится косвенными оценками на основе измерений, выполняемых на действующих моделях.

Показания дифференциального жидкостного манометра записываются визуально.

Скорость вращения ротора воздухонагнетателя измеряется цифровым тахометром.

Определение площади потери воздуха производится в зависимости от скорости вращения, когда поддерживается постоянное давление.

Расход воздуха Q через отверстие определенной площади S_u из емкости, когда поддерживается

постоянное давление P , равен определяемому по формуле

$$Q = \mu \times S_u \times \sqrt{2 \times P / \rho},$$

где μ – коэффициент истечения; ρ – массовая плотность воздуха.

Когда изменяется частота вращения n ротора воздухонагнетателя, то расход воздуха Q может быть найден по отношению к базовому значению (Q_n / n_n) с учетом скорости вращения

$$Q = (Q_n / n_n) \times n.$$

Предположение о равенстве расхода Q из емкости и характеристик расхода через площадь отверстия на модели имеет вид

$$S_u = (Q_n \times \sqrt{\rho}) / (n_n \times \mu) \times (n / \sqrt{2 \times P}),$$

где $(Q_n \times \sqrt{\rho}) / (n_n \times \mu)$ – постоянная величина.

Изменение скорости вращения ротора воздухонагнетателя n и соответствующее повышение давления воздуха P дают возможность оценить площадь истечения воздуха S_u из воздушной подушки косвенно по этим измерениям.

7. Экспериментальное оборудование для определения площади истечения

Экспериментальное оборудование для оценки площади истечения воздуха посредством измерений давления и скорости вращения ротора воздухонагнетателя показано на фотографии (Рис. 11).

Воздух от нагнетателя поступает в эластичную емкость, моделирующую воздушную подушку.

Истечение воздуха из воздушной подушки происходит через отверстие регулируемой площади от 30 до 140 кв. см. Давление в воздушной подушке измеряется жидкостным манометром в интервале от 300 до 3500 Па.

Осевой вентилятор DSP90mm используется в экспериментальной модели в качестве воздухонагнетателя.

Цифровой тахометр воздухонагнетателя позволяет измерять скорость вращения ротора в диапазоне от 22000 до 45000 об./мин.



Рис. 11 Экспериментальная модель для оценки площади истечения воздуха из воздушной подушки: 1 – эластичная емкость; 2 – воздухонагнетатель; 3 – отверстие истечения с регулируемой площадью

Результаты экспериментального исследования представлены на графике (Рис. 12).

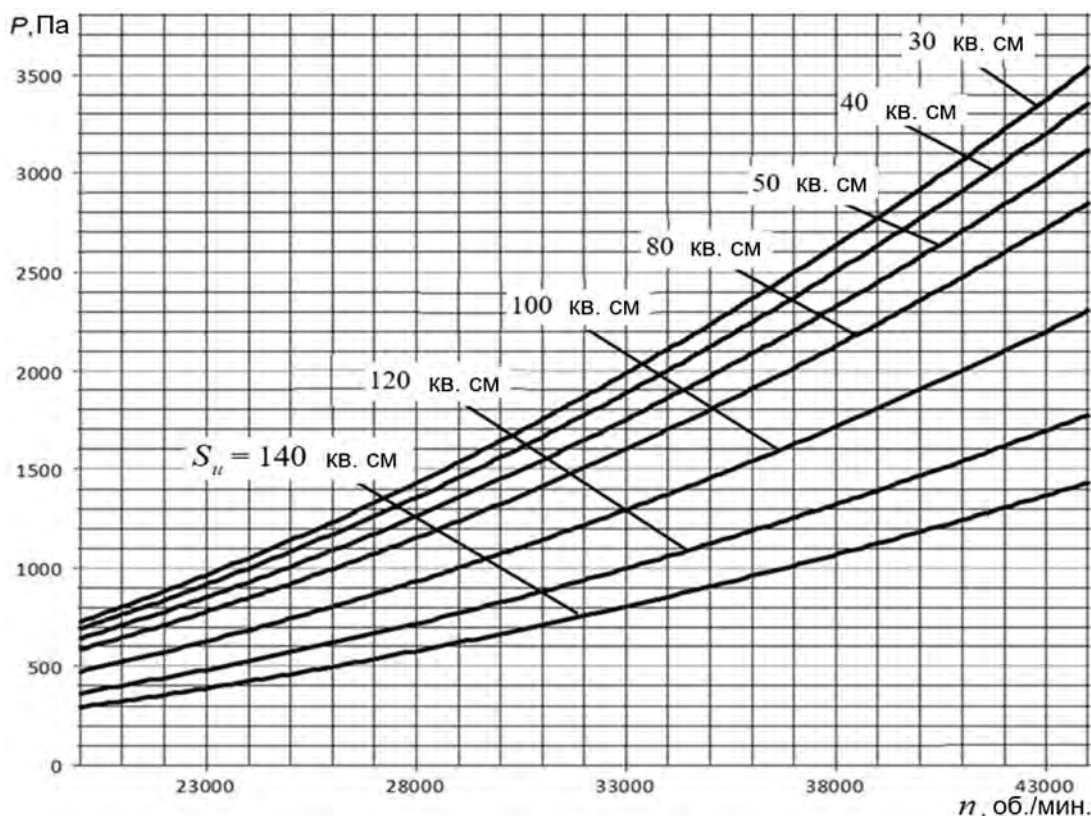


Рис. 12. Зависимость давления в воздушной подушке от скорости вращения ротора воздуходувателя n и от площади истечения воздуха S_u

Для проектных разработок полученные графические зависимости дают возможность оценивать площадь истечения воздуха на модели в зависимости от скорости вращения вентилятора и от давления в воздушной подушке, которые доступны к измерению на модели ТСВГ при использовании такого воздуходувателя. Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования осевых вентиляторов для поддержания давления воздуха в воздушной подушке в широком интервале в рамках надлежащего диапазона при определенной площади истечения воздуха.

8. Определение мощности двигателей на начальных стадиях проектирования амфибийного вездехода на воздухоопорных гусеницах

На начальных стадиях проектирования целесообразно использовать приближенный метод определения волнового сопротивления и буксировочной мощности скегового судна на воздушной подушке для оценки потребной мощности амфибийного вездехода на воздухоопорных гусеницах при глиссировании с учетом имеющейся гидродинамической аналогии.

Мощность двигателей, необходимая для преодоления максимума гидродинамического сопротивления должна быть достаточной, также, для движения по склону на суше. Обычная последовательность расчета, основанная на раздельном определении гидродинамического сопротивления при проектировании пропульсивного устройства малоприменима для определения

сопротивления амфибийного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах. При движении на воде, как сопротивление, так и необходимый упор движителя создаются на смоченной поверхности воздухоопорных гусениц.

Более точным методом нахождения буксировочного сопротивления и мощности могут служить экспериментальные исследования и их использование для определения мощности главных двигателей при проектировании [3], хотя на начальных стадиях проектирования выполнение модельного эксперимента может быть затруднительным.

8.1. Аналогия волнового гидродинамического сопротивления глиссирующей воздухоопорной гусеницы и обыкновенной воздушной подушки

Давление в воздушной подушке является неизменным по всей площади опоры. Распределение сил перпендикулярных набегающему потоку воды, поддерживающих воздухоопорную гусеницу, не изучено.

Поскольку лента воздухоопорной гусеницы прижимается к набегающему потоку воды равномерно распределенным избыточным давлением в воздушной подушке, логично предполагать, что распределенная нагрузка опорных реакций набегающего потока также постоянна в пределах контактной поверхности воздухоопорной гусеницы, что совпадает по характеру с воздействием набегающего потока на опорную площадь обыкновенной воздушной подушки.

Таким образом, на начальных стадиях проектирования вполне допустимо находить

волновое сопротивление воздухоопорной гусеницы как волновое сопротивление обычного судна на воздушной подушке при условии одинакового избытка давления воздуха в подушке.

Избыток давления воздуха в воздушной подушке P обеспечивает подъемную силу равную весу транспортного средства Δ (т.е. водоизмещению) $\Delta = P \times S_p$, где P – избыточное давление воздуха, S_p – площадь воздушной подушки (или контактная площадь воздухоопорной гусеницы).

Избыточное давление воздуха P действует перпендикулярно поверхности воды или контактной поверхности. Это воздействие давления воздуха в воздушной подушке создает вертикальные колебания, которые наблюдаются как волнообразование при движении транспортного средства, что говорит о наличии волнового сопротивления.

8.2. Определение гидродинамического сопротивления ТСВГ с использованием судна на воздушной подушке в качестве прототипа

Зависимость волнового гидродинамического сопротивления воздушной подушки от формы ее контура известна [6].

Используются данные прототипов с учетом пропорций размерений: соотношение длины L к ширине B_C во многом сходно с таковым для опорной поверхности воздухоопорной гусеницы L/B_C .

Для амфибийных судов на воздушной подушке рекомендуется придерживаться значения относительной длины в интервале $L/B_C = 2,0 \div 2,4$.

Для судов скегового типа на воздушной подушке целесообразно придерживаться следующего интервала $L/B_C = 2,5 \div 5,0$.

Для варианта транспортного средства грузоподъемностью 100 т (ТСВГ–100) [8] длина опорной части гусеницы на грунте равна $L = 10,0$ м. Предполагается, что при глиссировании длина смоченной поверхности воздухоопорной гусеницы близка к этой величине при постоянном избыточном давлении вдоль всей опорной части гусеницы.

На начальных стадиях проектирования можно предполагать, что ширина контакта гусеницы с набегающим потоком равна ширине гусеничной ленты, которая для транспортного средства ТСВГ–100 составляет около $B_C = 2,85$ м. Отношение длины L к ширине B_C ТСВГ–100 равно около $L/B_C \approx 3,5$.

Эта величина входит в диапазон значений относительной длины воздушной подушки для судов скегового типа.

8.3. Определение мощности двигателей транспортного средства на воздухоопорных гусеницах

Детальное описание результатов экспериментальных исследований и найденных значений слагаемых гидродинамического сопротивления при движении скегового судна на воздушной подушке и принятые технические рекомендации для нахождения мощности, требуемой для движения судна представлено разработанным методическим подходом Центра исследования и

усовершенствования судов David W. Taylor (DTNSRDC) [5].

Отношение гидродинамического сопротивления (и его слагаемых) к водоизмещению дано в зависимости от числа Фруда по длине воздушной подушки L . Можно предположить, что это равно длине контактной поверхности воздухоопорной гусеницы при определении числа Фруда для вездехода

$Fr_L = v / \sqrt{g \times L}$, где v – скорость транспортного средства, м/с.

Предполагая равенство волнового гидродинамического сопротивления скегового судна на воздушной подушке и транспортного средства на воздухоопорных гусеницах, и предполагая, также, равенство их аэродинамического сопротивления, вычитая сопротивление вязкостного трения скегов, так как для транспортного средства ТСВГ скеги подняты выше уровня воды, суммарное гидродинамическое сопротивление предполагается определять в зависимости от числа Фруда Fr_L по длине воздушной подушки. Зависимость буксировочного сопротивления по его относительной величине (по отношению к водоизмещению) представлена на графике (Рис. 13).

Относительно небольшие значения гидродинамического сопротивления соответствуют интервалам значений числа Фруда Fr_L от 1,2 до 1,8 на рассматриваемом графике.

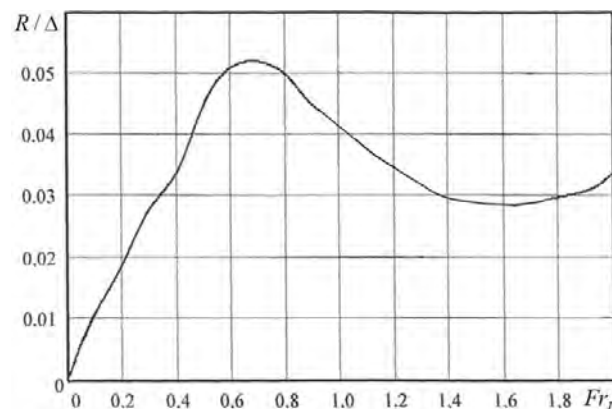


Рис. 13. Зависимость буксировочного сопротивления амфибийного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах R/Δ по относительной величине (на единицу водоизмещения) от числа Фруда Fr_L

Проекты транспортных средств на воздухоопорных гусеницах и соответствующие значения скорости ТСВГ [4], которая равна около 12 м/с (23,1 узл.), соответствуют меньшему значению числа Фруда из указанного интервала $Fr_L = 1,2$.

При использовании метода DTNSRDC необходимая мощность равна

$$N = (R/\Delta) \times \Delta \times v / (102 \times \eta).$$

Относительная величина гидродинамического сопротивления составляет $R/\Delta = 0,036$ при числе Фруда $Fr_L = 1,2$, как видно на графике (Рис. 13).

Водоизмещение (масса транспортного средства) ТСВГ–100 с грузом равно $\Delta = 140\,000$ кг.

Коэффициент полезного действия η воздухопорной гусеницы, действующей как движитель, модельными испытаниями найден в размере 0,50. Мощность воздухопорных гусениц, как движителей ТСВГ-100, при скорости 11,9 м/с (23,1 узл.) равна

$$N = 0,036 \times 140000 \times 11,9 / (102 \times 0,5) \approx 1174 \text{ кВт.}$$

В рамках рассмотренных допущений, учитывая энергозатраты для поддержания давления в воздушных подушках внутри гусениц, суммарные затраты энергии для движения на воде ТСВГ-100 равны $N_E \approx 1,1 \times N = 1291 \text{ кВт.}$

Потребная относительная мощность транспортного средства на воздухопорных гусеницах составляет $N_E / \Delta = 1291 / 140 = 9,2 \text{ кВт/т,}$ что в два раза меньше, чем необходимо для скегового судна на воздушной подушке, имеющего сопоставимые характеристики, размеры и скорость.

8.4. Определение необходимой мощности для преодоления «горба» гидродинамического сопротивления

На графике (Рис. 13) «горб» буксировочного сопротивления соответствует значению числа Фруда $Fr_L = 0,7$. При этом максимальное относительное гидродинамическое сопротивление равно $(R/\Delta) = 0,052$. Скорость транспортного средства равна $v = Fr_L \times \sqrt{g \times L} = 0,7 \times \sqrt{9,81 \times 10,0} = 6,93 \text{ м/с.}$

Мощность двигателей транспортного средства ТСВГ-100 необходимая для преодоления «горба» гидродинамического сопротивления равна $N = 0,052 \times 140000 \times 6,93 / (102 \times 0,5) = 989 \text{ кВт,}$ что меньше проектной мощности при скорости 11,9 м/с.

8.5. Определение мощности двигателей ТСВГ, необходимой для подъема на уклон при движении по суше

В соответствии с назначением проекта [5] ТСВГ-100 при водоизмещении (масса) транспортного средства в грузу 140 т возможно преодоление подъема 20 градусов при скорости 2,5 м/с (9 км/ч.).

Упор T гусениц, необходимый для преодоления подъема, определяется как $T = g \times \Delta \times \sin \alpha = 9,81 \times 140,0 \times 0,342 = 470 \text{ кН}$ ($\sin \alpha = 0,342$ если угол склона равен $\alpha = 20$ градусов).

При эксплуатационной скорости 2,5 м/с необходимая мощность движителей для преодоления подъема равна $N = T \times v / (102 \times \eta) = 47000 \times 2,5 / (102 \times 1,0) = 1152 \text{ кВт.}$

Проектная мощность 1174 кВт достаточна для преодоления уклона.

Коэффициент полезного действия η воздухопорной гусеницы при движении по суше принят ориентировочно 1,0.

Использование упрощенного метода DTNSRDC для приближенного определения мощности двигателей скеговых судов на воздушной подушке в варианте применения для оценки мощности двигателей вездеходов на воздухопорных гусеницах оправдано на начальных стадиях проектирования.

Этот метод позволяет найти необходимую мощность транспортного средства ТСВГ и мощность, необходимую для движения в море в проектом режиме, также как мощность для преодоления «горба» сопротивления.

9. Размеры и грузоподъемность транспортных средств на воздухопорных гусеницах

Разработанная и изученная совокупность проектных вариантов амфибийных транспортных средств на воздухопорных гусеницах охватывает диапазон значений грузоподъемности от 10 до 150 т.

Транспортное средство ТСВГ грузоподъемностью 10 т разрабатывалось для универсального применения в пассажирском и грузовом вариантах, для медицинских целей, спасательных, противопожарных, и др.

Для транспортного обслуживания прибрежного рыболовства было разработано техническое предложение по созданию амфибийного вездеходного транспортного средства грузоподъемностью 20 т.

Потребности доставки снабжения и продуктов в труднодоступные пункты на побережьях и к местам добычи углеводородов также были учтены.

Поддержка традиционного прибрежного рыболовства на северных побережьях и потребности регулярной транспортировки мороженой оленины и рыбы с применением вездеходов соответствует имеющемуся экономическому спросу.

Задачи увеличения размеров амфибийных вездеходов обычно связаны с потребностями доставки крупногабаритных грузов для освоения новых территорий, что может выступать основным требованием для перевозок амфибийными транспортными средствами.

Транспортное средство ТСВГ грузоподъемностью 20 т с учетом определенных ограничений соответствует всей совокупности вариантов назначения базового варианта вездехода грузоподъемностью 60 т.

Достаточно сложно определить ограничительное значение грузоподъемности универсального амфибийного вездехода. Современные оценки базируются на ограничении веса вездеходного транспортного средства в условиях влажного грунта летней тундры. Это основано на исследованиях [6] максимального допустимого давления на грунт колеса и гусеничных движителей, площадь опоры которых намного меньше чем типичная площадь контакта с грунтом воздухопорных гусениц.

Особенности деформирования сухих почв при больших скоростях передвижения дают основание считать, что дерн не будет разрушен при большой контактной площади и при большой скорости контакта при давлениях, меньших чем оказывают колеса и обычные гусеницы вездеходов.

Ограничение веса транспортного средства на воздухопорных гусеницах сложно определить для варианта движения по замёрзшему грунту. В качестве примера ограничений веса транспортного средства при воздействии на замёрзшую почву могут косвенно использоваться предельные значения веса грузовых самосвалов.

Для условий эксплуатации транспортного средства на воздухопорных гусеницах в море можно принимать ограничения веса по опыту эксплуатации

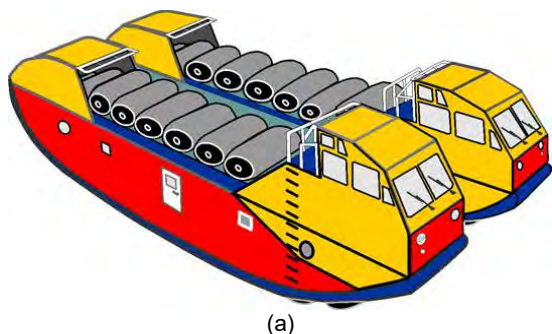
судов на воздушной подушке. По косвенной оценке режимов применения транспортных средств ТСВГ на воде и на твердом грунте можно предполагать что ограничение массы составляет от 250 до 300 т. При отсутствии опыта эксплуатации транспортных средств меньшего размера на воздухоопорных гусеницах создание больших вездеходов указанного размера представляется преждевременным.

В Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского выполнялась разработка технических предложений и проектов общего расположения амфибийных транспортных средств на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью до 100 т [2].

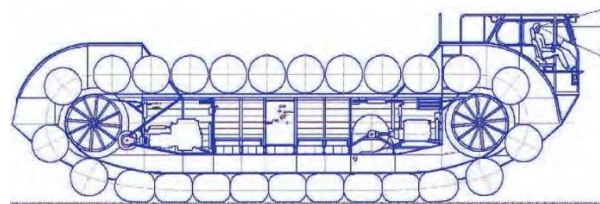
Для массы (водоизмещения) груженого вездехода (displacement) равной 140 т, его дина составляет 19,20 м, длина соединительного моста (между гусеницами) – грузовой платформы равна 13,0 м, ширина грузовой платформы – 3,0 м, ширина транспортного средства составляет 10,2 м, суммарная мощность двигателей равна 1270 кВт, что намного меньше, чем требуется для обычных судов на воздушной подушке таких же размеров и эксплуатационной скорости.

Финансирование разработки экспериментального транспортного средства осуществляется отдельными ведомствами и некоторыми коммерческими рыболовными компаниями на Дальнем Востоке Российской Федерации. Проектирование и создание экспериментальных образцов в разные годы осуществлялось при поддержке: Проектного бюро им. Р.Е. Алексеева, АО «ЦНИИМФ», ОАО «Сейсмотехника». На первоначальных этапах в работе принимало участие ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва». Работы продолжались по Федеральной научной программе «Развитие гражданской морской техники» в период с 2009 по 2016 г. Базовый вариант транспортного средства ТСВГ предназначался преимущественно для разгрузки судов на необорудованный берег.

Грузоподъемность 60 т ТСВГ в базовом варианте обосновывается потребностями доставки трех двадцатифутовых стандартных контейнеров ISO. Действующая модель создана в масштабе 1 : 4. Преимущества и эффективность базового варианта транспортного средства ТСВГ были подтверждены для разработанного диапазона размеров (рис. 4).



(а)



(б)

Рис. 14. Общее расположение амфибийного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах: (а) ТСВГ–100 грузоподъемностью 100 т; ТСВГ–20 грузоподъемностью 20 т

Транспортное средство на воздухоопорных гусеницах ТСВГ–100 разрабатывалось на основе корпуса ТСВГ–60. Накопленный опыт при проектировании общего расположения транспортного средства ТСВГ–60 был подтвержден при разработке полунатурной модели базового прототипа транспортного средства ТСВГ–100.

Предварительными проектными проработками ТСВГ–100 определенное снижение размеров транспортного средства достигается увеличением давления в воздушных подушках гусениц и в пневматических плицах, установленных на гусеничных лентах.

Общее расположение транспортного средства ТСВГ грузоподъемностью 100 т показано на схеме (Рис. 14 а) [4].

Исследована возможность создания за счет форсирования системы поддержания давления в нижней ветви гусеницы и, соответственно, в пневматических плицах транспортного средства на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 150,0 т в размерах ТСВГ–100, пригодного для доставки навалочных грузов. Основные проектные характеристики получены с учетом увеличения нагрузки и сохранения размеров, принятых для ТСВГ–100.

Возможность перевозок грузов большого размера оценена масштабным пересчетом геометрических характеристик транспортного средства ТСВГ–100 основываются на кубической зависимости дедвейта от масштаба размеров.

Пересчет выявил чрезмерно большие размеры (запас размеров) вездехода ТСВГ–100 и возможность увеличения размеров перевозимых грузов. При увеличении давления в воздушной подушке в полости гусеницы достигаемое улучшение характеристик ТСВГ связано с увеличением размеров грузовой платформы и снижением размеров воздухоопорной гусеницы при увеличении давления в ней.

Для заданных интервалов значений размеров ТСВГ выполнены исследования по федеральным программам: «Концептуальные проекты совершенствования судов – амфибийные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для промышленного рыболовства на шельфе» и «Создание технических предложений и эскизных проектов амфибийных вездеходов с воздухоопорными гусеницами для комплексного развития побережий океанов и замерзающих шельфовых морей».

Общее расположение транспортного средства ТСВГ–150 (Рис. 15) грузоподъемностью 150 т, разработанное в форме технического предложения,

имеет внешнее сходство по расположению с транспортным средством ТСВГ–100.

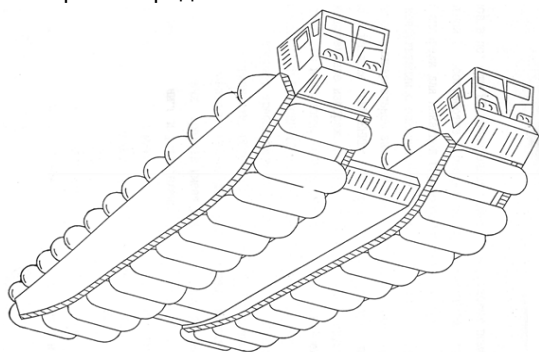


Рис. 15 Внешний вид амфибийного транспортного средства ТСВГ–150 грузоподъемностью 150 т

Амфибийное транспортное средство ТСВГ–150 характеризуется следующими элементами: грузоподъемность 150 т, водоизмещение в грузу 254 т, водоизмещение порожнем 104 т, длина габаритная 24,2 м, ширина 11,28 м, габаритная высота 6,9 м, длина грузовой платформы 13,3 м, ширина грузовой платформы 3,7 м, высота ограждения грузовой платформы 3,7 м, мощность двигателей ходовых 2000 кВт, мощность двигателя воздухонагнетателя 200 кВт, мореходность на волнении (наибольшая допустимая интенсивность волнения) 5 баллов, скорость на воде 23,3 узл., скорость по суше 70 км/ч., давление в воздушной подушке 31,2 кПа (0,3 атм.), клиренс скегов (высота полоза скега от грунта) 0,6 м, высота полости воздушной подушки 0,75 м, расстояние между осями барабанов 20,15 м, диаметр барабанов 1,4 м, длина внутригусеничного понтона 17,35 м, высота понтона 1,6 м, диаметр пневматических плит 1,25 м, длина гусеничной ленты 46,25 м, ширина гусеничной ленты 3,05 м, количество пневматических плит каждой гусеницы 37 шт., ширина внутренних скегов – по 0,4 м, ширина внешних скегов 0,34 м.

Размеры транспортного средства дают возможность перевозить следующие виды грузов: контейнеры в два яруса, негабаритные грузы, негабаритные конструкции и оборудование.

Высокие скорости транспортных средств на воздухоопорных гусеницах могут достигаться при существенно меньших затратах энергии, чем необходимо для традиционных амфибийных судов, благодаря сокращению расхода энергии при движении смоченных поверхностей гусениц в направлении набегающего потока и благодаря высокому коэффициенту полезного действия гусениц на грунте.

10. Амфибийный гусеничный вездеход, созданный в США

С 2008 г. исследовательский отдел Корпуса морской пехоты США (Marine Corps) проводил поисковые работы по замене амфибий на воздушной подушке для значительного снижения расхода топлива.

Возможным решением может служить экспериментальное амфибийное транспортное средство УНАС (Ultra Heavy–Lift Amphibious Connector, Рис. 16) грузоподъемностью 150 т. Работы

по созданию первого прототипа были начаты в 2012 г., и первые испытания проведены в июле 2014 г.



(а)



(б)

Рис. 16 Экспериментальное амфибийное транспортное средство УНАС повышенной грузоподъемности: (а) выход на берег; (б) вездеход на воде

<http://zele.ru/novosti/avia-i-oruzhie/caat-7085/>

Экспериментальное полунатурное амфибийное транспортное средство УНАС имеет длину 12,8 м, ширину 8 м, высоту 5,2 м.

Натурный вариант транспортного средства УНАС характеризуется элементами: длина 25,4 м, ширина 16,0 м, высота 10,4 м. Это амфибийное десантное транспортное средство может принимать на борт до 150 т груза, или 3 танка М1 Abrams.

Десантное амфибийное транспортное средство УНАС может двигаться по воде и по суше, а также преодолевать препятствия высотой до 3 м благодаря использованию гусеницы в качестве движителя.

Десантное амфибийное транспортное средство УНАС не имеет воздухоопорной гусеницы и пневматических плит. Специальные плиты изготовлены из затвердевшего пеннистого материала с воздушными порами.

УНАС легко движется по бездорожью и может доставлять людей и оборудование в любое место на побережье. УНАС преодолевает заболоченные области, а также илистые при отливе и др. На воде транспортное средство УНАС может двигаться с максимальной скоростью до 20 узл.

Успешное испытание крупномасштабной экспериментальной модели для изучения качеств транспортного средства УНАС дает основание считать удачным проект гусеничного вездехода грузоподъемностью 150 т. Указанное значение принято в США как предельная грузоподъемность.

11. Перспективы промышленного выпуска транспортных средств на воздухоопорных гусеницах

Исследования ТСВГ были инициированы Министерством транспорта Российской Федерации с целью создания амфибийных вездеходов для

разгрузки судов на необорудованный берег в Арктике и на Дальнем Востоке.

Многоплановое развитие северных территорий и побережий арктических морей создает спрос для регулярной транспортной доступности на обширных непроходимых территориях тундры и лесо–тундры и работы на шельфе круглый год.

Строительство амфибийных вездеходов на воздухоопорных гусеницах первоначально планировалась в рамках Российско–Канадского сотрудничества, осуществляемого Министерством регионального развития Российской Федерации с Канадскими партнерами.

На совещании по вопросам освоения Арктики на уровне Российско–Канадской межправительственной комиссии 31 января 2014 г. в Оттаве для указанной цели была сформирована Рабочая группа.

План Рабочей группы предполагал создание совместного предприятия для разработки и строительства арктических амфибийных вездеходов на воздухоопорных гусеницах (параграф 8 указанного Плана).

Потенциальным партнером по данному проекту со стороны Российской Федерации выступал Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского.

Примечание: Канада вышла из сотрудничества по данному проекту в 2014 г. в связи с санкциями. Министерство регионального развития РФ упразднено.

Работы необходимо продолжить усилиями российских предприятий и возможно на условиях международного сотрудничества и кооперации.

Выводы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на подготовку промышленного строительства амфибийных транспортных средств на воздухоопорных гусеницах. Для этой цели требуется решить следующие задачи:

- усовершенствование конструктивных элементов транспортного средства ТСВГ: гусениц (гусеничных лент, включая скользящие уплотнения воздушных подушек вдоль краев лент), пневматических плит, механизмов трансмиссии для приводных барабанов и трансмиссии для воздухонагнетателей;

- создание промышленных технологий производства этих конструктивных элементов – воздухоопорных гусениц с пневматическими плитами с использованием новых имеющихся материалов;

- унификация размерного ряда ТСВГ формирование концепции системы эксплуатационного обслуживания, в частности, с применением модульных конструктивных элементов, и др.

Работа по указанным направлениям могла бы быть выполнена совместно компаниями и ведомствами как российскими, так и зарубежными.

Литература

1. Азовцев А.И., Карпушин И.С., Москаленко О.В. Мореходные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для повышения эффективности освоения биоресурсов с баз на открытом побережье // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов мирового океана. Материалы V Международной научно-технической конференции. Часть 1, Дальрыбвтуз, Владивосток, 2018. С.5-6.
2. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Разработка типоразмерного ряда мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения побережья и замерзающего шельфа// «Морские интеллектуальные технологии». Спецвыпуск №1. 2013. С. 34-37.
3. Azovtsev A.I., Samsonov S.V. The hydrodynamic performances of air-supported caterpillar// The news of USSR Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics.– М.: USSR Academy of Sciences, 1986.– # 2– P. 172–174.
4. The development of technical assignment specifications. Explanatory note on design work « The development of technical assignment specifications and the general arrangement of the amphibious cargo vehicle with the air supported caterpillars of the load capacity 100 t» of May 24, 2017. Maritime State University named Admiral Nevelskoy. Vladivostok. 2017.
5. Wilson R.A., Wales S.M., Khober Ch.E. The determining of power of hovercraft based on model test results (DTNSRDC). David W. Taylor Naval ship research and development center. USA.5. Bunch J. Rose D (Eds.) Sparse matrix computations. – New York – San Francisco –London: Academic Press. 1976.
6. Vaganov A.M. The designing of fast speed vessels: the textbook for the universities – L.: Publishing house «Sudostroeniye», 1978. – 280 p.
7. Valkov V.E. Problems of organizing of the supply of harbors on the unequipped shores // The Proceedings of 9–th International scientific conference: The transportation problems of Far East. Vladivostok. – Maritime State University named Admiral Nevelskoy. – 2011. – P. 208–210.
8. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Техническое предложение по созданию мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах повышенной грузоподъемности // Морские интеллектуальные технологии. Спецвыпуск № 4 (42), т. 5, 2018. С. 39 – 44.

References

1. Azovtsev A.I., Karpushin I.S., Moskalenko O.V. Morekhodnye vezdekhody na vozduhoopornykh gusenichah dlya povysheniya effektivnosti osvoeniya bioresursov s baz na otkrytom poberezh'e [The all-terrain vehicles with air supported caterpillars assigned to increase the efficiency of the development of bio–resources from bases on the open coast] // Aktu-al'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov mirovogo okeana. Materialy V Mezhdunarod-noj nauchno-tekhniche-skoj konferentsii. CHast' 1, Dal'rybvtuz, Vladivostok, 2018. S.5-6.
2. Azovtsev A.I., Ogaj S.A., Moskalenko O.V. Razrabotka tiporazmernogo ryada morekhodnykh vezdekhodov na vozduhoopornykh gusenichah dlya kompleksnogo osvoeniya poberezh'ya i zamerzayushchego shel'fa [Development

- of the standard range of amphibious vehicles with the air supported caterpillars for coast and freezing offshore integrated development] // «Morskije intellektual'nye tekhnologii». Specvypusk №1.2013.S.34-37.
3. Azovtsev A.I., Samsonov S.V. The hydrodynamic performances of air-supported caterpillar// The news of USSR Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics.– M.: USSR Academy of Sciences, 1986.– # 2– P. 172–174.
 4. The development of technical assignment specifications. Explanatory note on design work « The development of technical assignment specifications and the general arrangement of the amphibious cargo vehicle with the air supported caterpillars of the load capacity 100 t» of May 24, 2017. Maritime State University named Admiral Nevelskoy. Vladivostok. 2017.
 5. Wilson R.A., Wales S.M., Khober Ch.E. The determining of power of hovercraft based on model test results (DTNSRDC). David W. Taylor Naval ship research and development center. USA.5. Bunch J. Rose D (Eds.) Sparse matrix computations. – New York – San Francisco –London: Akademik Press. 1976.
 6. Vaganov A.M. The designing of fast speed vessels: the textbook for the universities – L.: Publishing house «Sudostroeniye», 1978. – 280 p.
 7. Valkov V.E. Problems of organizing of the supply of harbors on the unequipped shores // The Proceedings of 9–th International scientific conference: The transportation problems of Far East. Vladivostok. – Maritime State University named Admiral Nevelskoy. – 2011. – P. 208–210.
 8. Azovtsev A.I., Ogaj S.A., Moskalenko O.V. Tekhnicheskoe predlozhenie po sozdaniyu morekhodnogo vezdekhoda na vozduhoopornyh gusenichah povyshennoj gruzopod"emnosti [The technological specification for the construction of the seaworthy all-terrain vehicle with the air-supported caterpillars of the increased cargo capacity] // Morskije intellektual'nye tekhnologii. Specvypusk № 4 (42), t. 5, 2018. S. 39 – 44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION OF THE AUTHORS

Азовцев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а, e-mail: Azovtsev@msun.ru

Anatoliy I. Azovtsev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50–a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; e-mail: Azovtsev@msun.ru

Сергей Алексеевич Огай, доктор технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхне-портовая, д. 50–а, тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

Sergei A.Ogai, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50–a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

Михаил Владиленович Войлошников, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Морской государственной университет, им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а; тел.: 8-914-705-6029, e-mail: michael.vladlen@gmail.com

Michael V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief research scientist of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; tel.: 8-914-705-6029, e-mail: michael.vladlen@gmail.com

Владимир Алексеевич Петров, кандидат технических наук, доцент Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а, e-mail: petrov@msun.ru

Vladimir A.Petrov, Ph.D. (Eng), Associate Professor of Maritime state university named Admiral Nevelskoi, 50–a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; e-mail: petrov@msun.ru

Москаленко Олег Владимирович, начальник отдела учёта и расследования транспортных происшествий, Дальневосточное управление государственного морского надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта, 690003, Владивосток, ул. Нижнепортовая, 3, e-mail: Moskalenko-ov@dvgosmornadzor.ru

Oleg V. Moskalenko, Director of the Department of control and investigation of traffic accidents, Far East Directorate for State of Maritime Supervision Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport, 3, Nizhneportovaya St., Vladivostok, 690003, Russia, e-mail: Moskalenko-ov@dvgosmornadzor.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.060

УДК 629.124.9.039.001.63

Принципы оценки верфи серийного модульного судостроения в системе отраслевых связей на Дальнем Востоке

С.А. Огай¹, М.В. Войлошников¹¹Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Развитие верфи и организация ее работы происходят в условиях экономического конкурирования, имеющего международный характер. Фактором экономических преимуществ для нового судостроительного предприятия выступает превышение спроса над предложением при строительстве судов новых проектов. Это преимущество действует при условии национальной поддержки и при субсидировании судостроения со стороны Правительства Российской Федерации, а также со стороны партнеров, инвестирующих в создание этой судостроительной верфи. Организация серийного модульного судостроения осуществляется поэтапно по мере накопления производственных мощностей и промышленных активов судостроительной верфи на первоначальном этапе. Ограничением в конкурентной среде в серийном судостроении выступает размер строящихся судов. При создании на верфи построечных мест для модульной сборки крупнотоннажных судов открываются возможности кооперирования действующих судостроительных предприятий на условиях их партнерства с этой верфью. По мере выполнения задач: освоения серийного судостроения, выполнения пилотных заказов и обязательств перед инвесторами, создания профессиональных коллективов, организации системы обучения кадров и др. судостроительная верфь в дальнейшем действует на условиях самофинансирования и самоокупаемости.

Ключевые слова: модульное судостроение, судостроительная верфь, крупнотоннажное судостроение, партнерство судоходства и судостроения, субсидии в развитие судостроения, спрос в инновационном судостроении, судосборочная верфь, кооперирование в судостроении

The concepts of the evaluation of batch modular shipbuilding yard in the system of the industrial networks characteristic in the Far East coast of Russia

Sergei A. Ogai¹, Michael V. Voyloshnikov¹¹Maritime state university named Admiral Nevelskoi

Abstract. The development of the shipyard and the organization of its operation take place in the conditions of economic competition of international feature. The factor of economic advantages of the shipbuilding yard created is the excess of demand over the supply of ships of new projects. This advantage is subject to the national support and the subsidizing of ships construction for the needs of Government of the Russian Federation, as well as by the contracts of partners investing in the shipbuilding company creation. The development of serial modular shipbuilding is carried out in stages, as the production capacities and industrial assets of the shipyard accumulate, this serves as the initial stage. The constraint in the in batch shipbuilding competitive environment is the size of the ships under construction. When creating construction sites for modular ship assembly at the shipyard the opportunities for cooperation of existing shipbuilding enterprises are opened based on their partnership with this shipyard. As the tasks are completed: the mastering large-scale batch shipbuilding, the fulfilling of the pilot contracts and the obligations to the investors, the creating professional teams, the establishing of the personnel training system, and the others, the shipyard will continue to operate on the basis of self-financing and self-sufficiency.

Key words: modular shipbuilding, shipyard, large-capacity shipbuilding, partnership of shipping and shipbuilding, subsidies for the development of shipyard, demand for innovative shipbuilding, ship-assembling yard, cooperation in shipbuilding

Введение

Заказчиками при серийной постройке морских гражданских судов выступают как правило судоходные компании или иные участники, работающие в интересах судоходных компаний. В интересах этих компаний могут действовать те или иные фонды или финансовые институты, федеральные ведомства. Возможны разные формы их участия: как инвестирование в основные средства и партнерство с учредителями, дольщиками или акционерами, так и контракты на постройку судов, изготовление конструктивных частей и модулей серийных судов, или производство судового оборудования. Определенное разнообразие форм участия партнеров в развитии судостроительных предприятий не меняет по сути того факта, что в системном отношении партнером в процессе развития судостроительной верфи выступает судоходная компания непосредственно или через названные организации, и это партнерство со

стороны судоходства служит фактором роста в судостроении.

Начальные процессы работы новой судостроительной верфи (Рис. 1 – 3, www.sskzvezda.ru), ее подразделений и производств идут в условиях, при которых на них может оказывать влияние внутриотраслевое конкурирование, имеющее международный характер.



Рис. 1. Судостроительная верфь ССК «Звезда». Здания блока цехов (а) и

Это видно на Дальнем Востоке, где Россия граничит со странами передового серийного судостроения.



а)



б)

Рис. 2. Судостроительная верфь ССК «Звезда»: (а) тяжелый достроечный стапель для модульной сборки строящихся судов; (б) кран «Голиаф» грузоподъемностью до 1200 т для установки блоков корпусов строящихся судов на сборочном стапеле

Пилотную загрузку комплексу Общества с ограниченной ответственностью (ООО) «Судостроительный комплекс «Звезда» (ССК «Звезда») обеспечивает ПАО «НК «Роснефть», заключившее эксклюзивное соглашение с АО «ДЦСС» о размещении всех заказов на строительство новой морской техники и судов на его мощностях, а также контракты на проектирование, строительство и поставку многофункциональных судов снабжения усиленного ледового класса, танкеров типа «Афрамекс», арктических танкеро-челноков ледового класса Arc7, арктического танкера-челнока дедвейтом 69 тыс. тонн и бурового судна. Дополнительные заказы ССК «Звезда» имеет от компаний ФГУП «Росморпорт», ПАО «Совкомфлот» и ПАО «Газпром».



Рис. 3. Транспортно–передаточный док грузоподъемностью 40 000 т для спуска строящихся судов и плавучих частей судов на судовой верфи ССК «Звезда»

В портфеле заказов ССК «Звезда» имеется свыше 30 судов, а прогноз производственной программы до 2035 года составляет порядка 180 единиц судов и морской техники.

Выполняемые и планируемые заказы ССК «Звезда» включают:

- многофункциональные суда снабжения ледового класса (4 шт.);
- арктические танкеры дедвейтом 42 тыс. т (10 шт.);
- арктический танкер дедвейтом 69 тыс. т (1 шт.);
- ледокол с малой осадкой (1 шт.);
- танкеры класса «Афрамекс» (10 шт.);
- ледоколы проекта 10510 ЛК-120 (2 шт.).

1. Технологические и инвестиционные ограничения

При планировании инвестиций в создание судовой верфи для модульной серийной постройки судов нужно учитывать имеющиеся технологические и инвестиционные ограничения [3–5], среди которых можно назвать следующие:

1. Ограничение размеров строящегося судна, связанное с возможностями судосборки и спуска на воду.

Современное отношение к экологии и защите морской среды во многих случаях связано с увеличением размеров строящихся судов, при этом в расчете на единицу размера судна можно достичь наилучших показателей не только в экономическом, но и в экологическом отношении, что служит одной из предпосылок для развития постройки так называемых чистых судов (Green Ships).

Создание стапеля для сборки крупнотоннажных судов или сухого дока требует больших первоначальных инвестиций, которые не каждому судостроительному предприятию под силу, тем более на начальных этапах его работы, когда высока совокупная потребность в инвестировании по всем создаваемым подразделениям.

Поскольку рыночный спрос в отношении судостроительной продукции в значительной части относится к названному сегменту крупнотоннажных судов, то те предприятия, которые не имеют соответствующих возможностей сборки и спуска на воду судов большого водоизмещения в этом смысле отделены от спроса, что может оказывать влияние на их экономические перспективы.

Выходом в таком случае для небольших заводов могло бы служить партнерство с крупной судосборочной верфью, что потребовало бы определенного репрофилирования этих заводов на производство модулей крупнотоннажных судов и на приведение используемых технологических подходов в соответствие с теми стандартами, которые характерны для сборочной верфи, а также нахождение организационных принципов совместной работы с этой судовой верфью.

2. Ограничение, связанное с серийностью, возникающее в связи с тем, что внутриотраслевое конкурентное в судостроении характерно при постройке серий судов в соответствии с рыночным спросом.

При создании судостроительной верфи и на начальном этапе ее работы поддержкой и дополнительным ресурсом для развития может

служить доступный, например, национальный спрос в отношении создания единично или небольшими сериями для нужд правительственных ведомств, которые тем самым оказывают помощь в развитии верфи, или для государственных корпораций, в частности судов для замерзающих морей, омывающих побережья Российской Федерации.

С другой стороны, использование в качестве ресурса для развития судостроительной верфи доступного спроса в отношении постройки единично или малыми судами по заказам ведомств или корпораций в дальнейшем будет связано с перепрофилированием верфи после создания ее производственных мощностей и накопления достаточных промышленных активов, то есть переориентирование на выпуск серийных судов, востребованных рыночным спросом, по мере улучшения отраслевой конкурентоспособности верфи, и при условии удовлетворения спроса этих ведомств и корпораций в постройке судов для их нужд, т.е. при выполнении обязательств судостроительной верфи по отношению к партнерам.

Работу верфи можно было бы охарактеризовать двумя общими этапами по выпуску строящихся судов, первый из которых связан с созданием и накоплением технологических активов с использованием помощи инвесторов (партнеров при создании верфи). Инвесторы могут участвовать в создании верфи в той или иной форме, например, в форме заказов на постройку судов для собственных нужд, а второй общий этап связан с перепрофилированием верфи на задачи модульного судостроения, направленного на удовлетворение рыночного спроса в отношении судов, в том числе, крупнотоннажных, при котором достигается наибольшая эффективность этой технологии, а технологические процессы базируются на широком применении автоматизированных средств и современных технологических процессов при изготовлении конструктивных модулей этих судов.

Исследование принципов организации серийного модульного судостроения на верфи основывается на сопоставительной оценке вариантов. На заключительном этапе создания судостроительной верфи методологически нужно придерживаться условия возврата субсидий, то есть, инвестиций, осуществленных партнерами, что служит системной предпосылкой при оценке эффективности вариантов создания верфи: учреждения, постройки, оснащения и налаживания работы по экономическим критериям.

Продажа действующей судостроительной верфи после ее создания другому собственнику, служащая одной из предпосылок для нахождения экономических показателей, не означает безусловный факт, а выступает предметом экономической целесообразности для партнеров, осуществивших инвестирование в создание верфи.

2. Строительство цехов ССК «Звезда»

Начало строительству комплекса было положено в 2009 году. Общество с ограниченной ответственностью «Судостроительный комплекс «Звезда» учреждено 17 декабря 2015 года. Учредителями судостроительного предприятия выступили: АО «Роснефтегаз», ПАО «НК «Роснефть» и АО «Газпромбанк».

Основные производственные площадки ССК «Звезда» создаются в последовательности двух этапов (очередей).

- В первую очередь созданы:
- блок корпусных производств (Рис. 4 и 5);
 - окрасочные камеры (Рис. 5 б);
 - сборочный стапель.



(а)



(б)

Рис. 4. Помещения в построенных зданиях корпуснопроизводственных цехов ССК «Звезда» по изготовлению конструктивных модулей, 2015 г.



(а)



(б)

Рис. 5. Монтаж оборудования для изготовления деталей корпусов судов, блоков и секций в помещениях цехов. Покрасочные камеры ССК «Звезда»

Запланировано создание, а также находятся в процессе постройки и дооснащения следующие производственные подразделения:

- сухой док (в постройке, 485 × 114 × 14 м);

- производственные цеха полного цикла (т.е. корпусообработывающие для производства крупнотоннажных судов);
- цеха для постройки конструкций для морского шельфа.

Поэтапный ввод в эксплуатацию всего комплекса производств ССК «Звезда» будет завершён к концу 2024 года. Должно быть создано 7,5 тыс. новых рабочих мест.

Наибольший объем ежегодного выпуска в корпусообработывающих цехах ССК «Звезда» в перспективе может составить до 330 тыс. т.

Данный объем судокорпусного производства согласуется с планируемой производительностью на судосборочных участках верфи (т.е. на действующем стапеле и в создаваемом сухом доке).

В результате, после ввода в эксплуатацию всех создаваемых производственных мощностей ССК «Звезда» будет самым крупным судостроительным предприятием Российской Федерации по размерам тоннажа строящихся судов.

3. Оборудование и технологические процессы, применяемые в цехах ССК «Звезда»

В корпусопроизводственных цехах ССК «Звезда» действует высокоточное и производительное автоматизированное оборудование (Рис. 6), которое позволяет выполнять технологические операции с профильным и листовым прокатом и выпускать крупногабаритные секции и модули судна, передаваемые на стапель для сборки с применением кранов большой грузоподъемности.

Корпусные модули в цехах изготавливаются из микропанелей и секций (Рис. 7). При изготовлении конструктивных элементов применяется автоматизированный сварочный портал.

Изготовление криволинейных листов осуществляется с помощью автоматизированного прессы усилием до 1000 т (Рис. 8) по 3-D шаблонам криволинейных конструкций судов.



(a)



(б)

Рис. 6. Установка для автоматизированной плазменной резки при изготовлении деталей корпусов строящихся судов (толщиной до 300 мм)



(a)



(б)

Рис. 7. Участки сборки микропанелей и секций корпусов строящихся судов на предприятии ССК «Звезда»



Рис. 8. Автоматический пресс для гибки по 3-D шаблонам криволинейных конструкций судов, строящихся на предприятии ССК «Звезда»

Тавровые конструкции корпусов строящихся судов большого размера изготавливаются из плоского проката в корпусопроизводственном цехе с применением автоматизированной установки для бесконтактной сварки методом индукционного нагрева (Рис. 9).

Используемая технология позволяет минимизировать остаточные напряжения и температурные деформации и достичь наилучших механических качеств изготовленных тавровых конструкций, что имеет принципиальное значение при постройке судов большого тоннажа, а также судов усиленных ледовых классов [2].

До отправки на сборочный стапель трубопроводы судовых систем и элементы оборудования устанавливаются в модульных секциях двойного дна и бортов (Рис. 10) и внутри иных отсеков при их изготовлении, что позволяет уменьшить трудоемкость монтажных работ на построечных местах, а также повысить качество сборки, сохранность устанавливаемых конструктивных элементов и уменьшить издержки, связанные с их транспортировкой и хранением на верфи.



(а)



(б)

Рис. 9. Установка для бесконтактной сварки на предприятии ССК «Звезда» таверовых конструкций методом индукционного нагрева



(а)



(б)

Рис. 10. Установка конструкций и трубопроводов в пространствах двойного дна и в отсеках корпуса судна ледового плавания, строящегося по проекту IBSV 10022 АН

4. Постройка на предприятии ССК «Звезда» серии многоцелевых судов снабжения усиленного ледового класса по проекту IBSV 10022 АН

На судовой верфи ССК «Звезда» в процессе постройки находятся суда снабжения усиленного ледового класса проекта IBSV 10022 АН (Рис. 11). Планируется постройка четырех судов этого проекта.

Суда по проекту IBSV 10022 АН предназначены для выполнения следующих задач:

- перевозки грузов к/от морских буровых установок и добычных платформ;
- заводки якорей;
- ледокольных операций;
- контроля ледовой обстановки;
- спасания во льдах экипажей, терпящих бедствие;
- сопровождения судов, не имеющих достаточной ледовой категории;
- ликвидации разливов нефти;
- борьбы с внешними пожарами;
- буксировки самоподъемных платформ и других крупногабаритных объектов;
- перевозки на главной палубе стандартных контейнеров ISO.



Рис. 11. Модель многоцелевого судна снабжения усиленного ледового класса, строящегося на верфи ССК «Звезда» по проекту IBSV 10022 АН

В корпусопроизводственных цехах ССК «Звезда» осуществляется изготовление набора корпусов и сборка секционных модулей строящихся судов по проекту IBSV 10022 АН, производство плоских и объемных секций (Рис. 12 и 13).



Рис. 12. Изготовление набора и сборка носовой секции многоцелевого судна снабжения усиленного ледового класса, строящегося по проекту IBSV 10022 АН

При изготовлении деталей применяются автоматизированные установки для резки, гибки и сварки и др. технические средства.

Для доставки укомплектованных модульных секций массой до 240 т по территории верфи ССК «Звезда» на сборочный стапель используются самоходные платформы (Рис. 14).

Сборка корпусов строящихся судов на стапеле верфи ССК «Звезда» и установка оборудования производятся с помощью кранов большой грузоподъемности, в том числе, крана «Голиаф» грузоподъемностью до 1200 т (Рис. 15–17). Также для судосборки используются краны грузоподъемностью 300 и 100 т.



(а)



(б)

Рис. 13. Изготовление объемных модулей судна усиленного ледового класса (кормовой и носовой секций), строящегося по проекту IBSV 10022 АН



(а)



(б)

Рис. 14. Доставка на сборочный стапель верфи ССК «Звезда» модуля массой до 240 т корпуса судна



Рис. 15. Использование крана «Голиаф» для сборки крупных корпусных модулей судна усиленного

ледового класса, строящегося по проекту IBSV 10022 АН



Рис. 16. Сборка корпусных модулей и плоских секций на достроечном стапеле верфи ССК «Звезда»



(а)



(б)

Рис. 17. Стыковка на стапеле верфи ССК «Звезда» модульных секций корпуса многоцелевого судна усиленного ледового класса, строящегося по проекту IBSV 10022 АН

5. Постройка на предприятии ССК «Звезда» крупнотоннажного нефтеналивного судна проекта 114К

На стапеле судовой верфи ССК «Звезда» в процессе постройки находятся нефтеналивное судно класса «Афрамекс» проекта 114К дедвейтом 114 тыс. т (Рис. 18 и 19), предназначенное для перевозки сырой нефти и нефтепродуктов. С учетом высоких стандартов экологической безопасности на судне проекта 114К предусмотрена комбинированная по топливу силовая установка, как главный двигатель, так и вспомогательные, в составе которой, работают как на дизельном топливе, так и на природном газе.



Рис. 18. Проект 114К нефтеналивного судна дедвейтом 114 тыс. т, строящегося на верфи ССК «Звезда»



(а)



(б)

Рис. 19. Модульные части нефтеналивного судна проекта 114К на стапеле верфи ССК «Звезда»

При изготовлении модулей корпуса нефтеналивного судна проекта 114К в корпусопроизводственных цехах предприятия ССК «Звезда» исходные размеры крупногабаритного листового проката могут составлять до 20 × 4 м. Для изготовления деталей такого размера без деформирования листов применяется специализированный кантователь.

Для спуска на воду судов и крупных модульных частей судов, собранных на стапеле судовой верфи ССК «Звезда» применяется транспортно–передаточный док грузоподъемностью 40 000 т.

Использование транспортно–передаточного дока для перемещения в акватории ССК «Звезда» модульной части нефтеналивного судна проекта 114К, включая среднюю часть судна с грузовыми отсеками и его кормовую часть с надстройкой, машинным отделением и установленными емкостями для газового топлива, показано на фотографии (Рис. 20).



Рис. 20. Использование транспортно–передаточного дока для перемещения кормовой модульной части при сборке корпуса нефтеналивного судна проекта 114К

6. Предпосылки для оценки и критерии эффективности инвестиций в создание ССК «Звезда» и организацию постройки судов

Помимо спроса на постройку судов для федеральных нужд и для инвесторов, в соответствии с заключенными контрактами с ними на последующих этапах важным мотивирующим фактором для непрерывного развития судостроительного предприятия служит рыночный спрос в отношении серийно строящихся судов разных типов, а также иной продукции судостроения, производимой серийно.

Экономические критерии, которые нужно использовать для оценки работы создаваемой судостроительной верфи, следующие [1]:

- срок окупаемости инвестиций и/или связанный с ним показатель внутренней нормы прибыли *IRR* (Internal Rate of Return), соответствующий показателю рентабельности, откорректированному на индекс инфляции (характеристику темпа роста индекса потребительских цен);

- чистая текущая стоимость *NPV* (Net Present Value), как разница рыночной капитализации ССК «Звезда» и совокупных инвестиций в его создание, соответственно оба исходных показателя подлежат определению на общую дату, например, на дату учреждения ООО «Судостроительный комплекс «Звезда».

При осуществлении сопоставительной оценки вариантов планирования ССК «Звезда» факторами отличия сравниваемых вариантов могут быть следующие данные:

- характеристики созданных и создаваемых активов и имущественного комплекса ССК «Звезда»;

- перечень и характеристики выпускаемой судостроительной продукции, в том числе помимо строящихся судов такой продукции, как оборудование для судов: устройства, двигатели пригодные для использования в морских условиях, электромеханическое оборудование, средства автоматизации и др.;

- характеристики размеров и времени (периодичности) финансирования, включая как

первоначальные инвестиции и иное увеличение первоначального капитала, а также использование заемных финансовых средств, так и доходы от профильной деятельности, а также прибыль от этой деятельности, инвестируемую в основные средства ССК «Звезда»;

– фактор времени, т.е. количество, целевая номенклатура и характеристики этапов создания ССК «Звезда».

В методологическом отношении для целей экономической оценки создание ООО «Судостроительный комплекс «Звезда» можно было бы считать осуществленным при достижении следующих результатов:

– завершение постройки и оснащения корпусопроизводственных подразделений, сооружений судовой верфи по модульной сборке судов;

– освоение постройки инновационных судов для нужд инвесторов, финансирующих пилотные задачи ССК «Звезда», в том числе постройку судов ледового плавания;

– освоение строительства серийных судов в соответствии с потребностями рыночного спроса;

– осуществление выкупа активов, созданных на бюджетные субсидии, и возврат этих субсидий в бюджет в размере, который определен при субсидировании, включая оговоренные проценты;

– завершение создания планируемого количества рабочих мест на построенных и реконструированных верфях, решение социальных вопросов для работников судостроительной верфи;

– создание системы образования и профессиональной подготовки работников судостроительной верфи по программам кораблестроения и связанных направлений и др.

Организация системы профессионального обучения по этим программам для подготовки достаточного количества работников различных квалификационных уровней выступает критически важной задачей, предопределяющей общую длительность создания действующей судостроительной верфи.

На этапе развития судостроительных предприятий, особенно на начальном этапе обычно требуется участие федеральных ведомств и бюджетные субсидии, или участие инвесторов, действующих от имени заинтересованных федеральных ведомств, по следующим причинам:

1. Начальный этап включает выполнение таких задач, как налаживание межотраслевого и международного сотрудничества, организацию системы обучения и профессионального сообщества в сфере кораблестроения и др., которые могут быть решены только на наиболее высоком уровне организации.

2. Служащие факторами развития судостроительного предприятия экономическое преимущества при постройке судов новых типов характеризуются, с одной стороны, превышением рыночного спроса над предложением, с другой стороны, отставанием этого стимулирующего фактора по отношению к возникающим потребностям в субсидиях.

7. Общая задача оценки эффективности ООО «Судостроительный комплекс «Звезда»

В стандартной постановке нахождение критериев (IRR и NPV) производится на основе определения следующих показателей учета и рыночной оценки активов судовой верфи:

– собственного и инвестированного капитала;
– краткосрочных и долгосрочных обязательств;
– основных средств и оборотных активов;
– изменения оборотного капитала и долгосрочных обязательств;

– дебиторской и кредиторской задолженности;
– выручки и себестоимости продаж.

Помимо этого, в целях планирования и сопоставительной оценки вариантов развития судовой верфи для определения критериев оцениваются внешние экономические характеристики и показатели профильной деятельности судовой верфи, среди которых:

– прогнозы инфляции, обменного курса, инвестиционных рисков и ставки дисконтирования (i);
– планируемые затраты, доходы и прибыль, соответствующие заключенным контрактам на постройку судов и характеристикам производственной мощности судовой верфи.

Создание действующей судостроительной верфи в системном отношении охватывает два последовательных этапа, которые могут в отдельных частях выполняться совместно:

Этап 1. Создание верфи, т.е. основных технологических активов для выпуска конструктивных модулей и сборки судов, в частности, для нужд правительства или иного инвестора, который может действовать от имени или в интересах правительственных ведомств: субсидируемые инвестиции RC_3 создают доход верфи I_3 .

Этап 2. По мере выполнения пилотной программы заказов, осуществляемой на первом этапе, переход верфи на самокупаемость при выполнении серийных заказов на постройку судов в соответствии с рыночным спросом, что с учетом планируемых доходов I_3 и операционных расходов C_3 судовой верфи соответствует ее капитализации: $(I_3 - C_3)/i$.

В итоге выполнения второго этапа в системном отношении предполагается передача созданных активов судовой верфи корпоративным инвесторам по мере выкупа ими этих активов и возвращения субсидированных в создание верфи инвестиций (RC_3) в бюджет или первоначальным инвесторам. Приведенная последовательность служит моделью замкнутого экономического цикла. Предполагается, что в частных случаях этапы могли бы быть иные, но в методологическом отношении эквивалентные возврату субсидий и выполнения взятых обязательств.

Партнёрами для судостроительной верфи непосредственно или через представителей, в том числе, через ведомства, финансовые учреждения и пр., или партнерами в форме участников (дольщиков, учредителей или акционеров) в системном отношении выступают компании, осуществляющие

судоходство, и это партнерство для судоверфи является фактором развития.

Критерий в форме чистой текущей стоимости NPV_3 , определяемого в данной постановке как разность рыночной капитализации верфи и совокупных издержек, для оценки вариантов инвестирования в ее создание с учетом определенной совокупности допущений имеет вид

$$NPV_3 = (I_3 - C_3) / i - RC_3, \quad (1)$$

где I_3 и C_3 – совокупный годовой доход судостроительной верфи и годовые операционные затраты, соответствующие в сумме доходам

контрагентов (выплатам контрагентам со стороны верфи по субподрядным контрактам) и собственным операционным затратам верфи, i – ставка дисконтирования, т.е. макроэкономический показатель суммарных рисков, RC_3 – совокупный размер инвестиций в создание активов верфи, определяемый по текущей стоимости на тот же момент времени, что и операционные затраты, опережая на год показатель совокупного дохода I_3 .

Используемые обозначения основных показателей с учетом характерных соотношений между ними в системе отраслевых связей верфи с другими участниками показаны в Таблице.

Таблица

Взаимозависимость экономических показателей судостроительной верфи, партнёров и подрядчиков

Отраслевая модель	Инвестиции	Затраты	Доходы	Критерий
1. Экономическое окружение	i
2. Судоходные компании (заказчики)	$RC_2 = I_3 / IRR_2$	C_2	I_2	NPV_2 или IRR_2
3. Судостроительная верфь	RC_3	$C_3 \sim I_4$	$I_3 = RC_2 \times IRR_2$	NPV_3 или IRR_3
4. Контрагенты верфи (субподрядчики)	$I_4 \sim C_3$...

С учетом соотношении внутренней нормы прибыли IRR_3 судостроительной верфи и рыночной стоимостью издержек: $RC_3 = (I_3 - C_3) / IRR_3$, критерий в форме чистой текущей стоимости NPV_3 можно преобразовать к виду

$$NPV_3 = (I_3 / i) \times (1 - C_3 / I_3) \times (1 - i / IRR_3). \quad (2)$$

или, учитывая, что поступающие (или планируемые) доходы верфи соответствуют инвестициям в судоходных компаниях: $I_3 = RC_2 \times IRR_2$, критерий чистой текущей стоимости NPV_3 определяется как

$$NPV_3 = RC_2 \times (IRR_2 / i) \times (1 - C_3 / (RC_2 \times IRR_2)) \times (1 - i / IRR_3) \quad (3)$$

где RC_2 – планируемые и осуществляемые совокупные инвестиции в судоходных компаниях в основные средства (строящиеся суда), связанные с доходами судостроительной верфи;

$RC_2 \times (IRR_2 / i)$ – денежный поток, соответствующий макроэкономической оценке инвестиций в судоходстве, третий множитель в формуле (3) означает рентабельность продаж R_{I3} судостроительного предприятия, то есть отношение прибыли (или чистого операционного дохода: $I_3 - C_3$) к совокупному доходу верфи $I_3 = RC_2 \times IRR_2$:

$1 - C_3 / (RC_2 \times IRR_2) = 1 - C_3 / I_3 = (I_3 - C_3) / I = R_{I3}$; четвертый множитель в формуле (3) показывает соотношение индикатора внутренних экономических рисков i_{R3} , т.е. собственных, несистематических рисков судоверфи, к ее внутренней норме прибыли i_{R3} / IRR_3 : $i_{R3} / IRR_3 = 1 - i / IRR_3 = i_{R3} / (i + i_{R3})_3$,

при этом учитывается, что внутренняя норма прибыли превышает ставку дисконтирования на размер показателя отраслевых экономических рисков i_{R3} , обозначающего премию за риск инвестирования в судостроительной отрасли $IRR_3 = i + i_{R3}$.

С учетом пояснений к формуле (3) показатель чистой текущей стоимости NPV_3 определяется как

$$NPV_3 = RC_2 \times (IRR_2 / IRR_3) \times (i_{R3} / i) \times R_{I3}, \quad (4)$$

а капитализация судостроительной верфи

$$RC_3 + NPV_3 = RC_2 \times (IRR_2 / i) \times R_{I3}. \quad (5)$$

В рамках предположения об установившемся инвестиционном балансе в связанных отраслях судостроения и судоходства (экономическая равнозначности инвестирования), при котором внутренняя норма прибыли в судостроении равна этому показателю в судоходстве: $IRR_2 = IRR_3$, зависимости (4 и 5) чистой текущей стоимости и капитализации судоверфи от размеров финансирования по программам ее загрузки RC_2 , в частности, от пилотной программы строительства судов для учредителей и партнеров, и от используемых в этих формулах показателей финансовой оценки имеют вид

$$NPV_3 = RC_2 \times (i_{R3} / i) \times R_{I3},$$

или $NPV_3 = RC_2 \times (IRR_3 / i - 1) \times R_{I3}$

$$\text{и } RC_3 + NPV_3 = RC_2 \times ((i + i_{R2}) / i) \times R_{I3}, \quad (6)$$

$$\text{тоже } RC_3 + NPV_3 = RC_2 \times (IRR_3 / i) \times R_{I3}$$

при $i_{R2} = i_{R3}$, когда $IRR_2 = IRR_3$.

Для построения и анализа зависимостей также принято предположение, что рентабельность продаж R_{I3} по величине меньше внутренней нормы прибыли ($IRR_3 = IRR_2$) и составляет около $\frac{2}{3}$ от нее, что в общем приближении соответствует характерному значению этого показателя в судостроении и судоходстве: $R_{I3} \approx \frac{2}{3} \times IRR_3$.

Макроэкономический показатель ставки дисконтирования практически может быть определен с учетом безрисковой части этой ставки и поправки на систематический риск. Для этого могут использоваться методы инвестиционной оценки [5].

При анализе формы зависимостей показателей: прогноза рыночной капитализации судостроительного предприятия ($RC_3 + NPV_3$) и его чистой текущей стоимости (NPV_3) от размеров инвестирования (RC_2) в постройку судов и от показателей финансовой оценки по формулам (6) можно предварительно принять показатель ставки рефинансирования Банка России в размере 6 %.

А когда расчет производится в иностранной валюте, что довольно характерно в судостроении и морском судоходстве, нужно к указанному значению ставки применить уменьшающую поправку в размере от 1 до 3 %, которая равна характерной разности значений показателей инфляции потребительских цен в иностранной валюте и в рублях.

В рамках этого допущения ставка дисконтирования равна около 5 %, а внутренняя норма прибыли для судостроительного предприятия при нахождении капитализации предприятия или его чистой текущей стоимости может быть оценена с учетом показателя отраслевых рисков i_{R3} как: $IRR_3 = 0,05 + i_{R3}$.

Обзор заключенных и планируемых в перспективе контрактов дает возможность наметить интервалы данных для построения графических зависимостей (Рис. 21) прогнозных показателей капитализации и чистой текущей стоимости судостроительного предприятия.

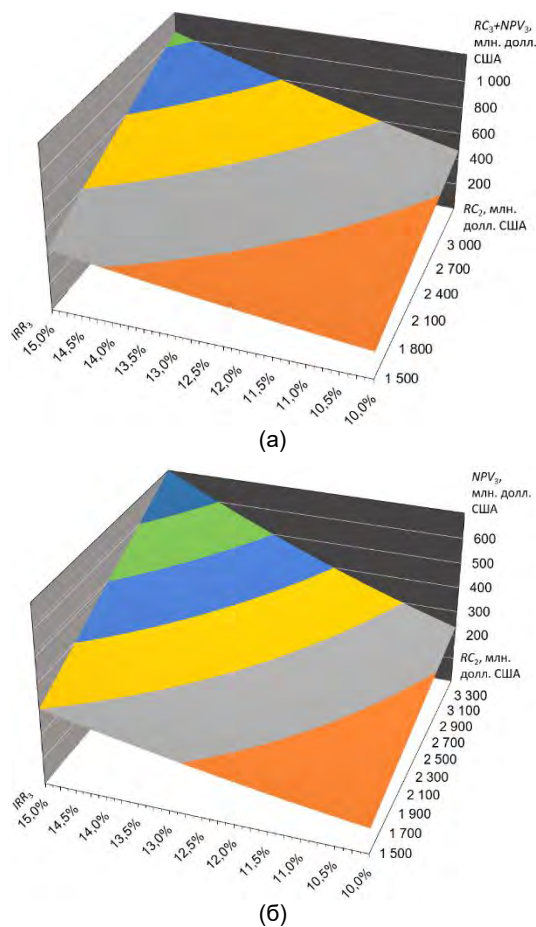


Рис. 21. Зависимости показателей судостроительного предприятия: (а) рыночной

капитализации ($RC_3 + NPV_3$) и (б) чистой текущей стоимости (NPV_3) от прогноза данных: объема заказов ($RC_2 = I_3 / IRR_2$) и внутренней нормы прибыли ($IRR_3 = i + i_{R3}$)

Для построения графиков при выборе интервалов данных прогнозный размер инвестирования по заключенным и планируемым контрактам на постройку судов принят в интервале значений с учетом следующего обзора ССК «Звезда»:

- многофункциональные суда снабжения ледового класса проекта IBSV 10022 АН (4 шт.: «Александр Невский», «Владимир Мономах», «Катерина Великая» и «Святая Мария»), контракт на постройку каждого из судов составляет около 12 млрд руб.;
- арктические танкеры дедвейтом 42 тыс. т (10 шт.);
- арктический танкер дедвейтом 69 тыс. т (1 шт.);
- ледокол с малой осадкой (1 шт.) проекта 22740 (и план постройки в дальнейшем трех аналогичных судов);
- танкеры класса «Афрамекс» проекта 114К дедвейтом 114 тыс. т (10 шт.), исходя из планируемых субсидий в размере 12,5 млрд руб. – за две единицы;
- ледоколов по проекту 10510 ЛК-120 «Лидер» (2 шт.), размер контракта, по предварительной оценке, 127,5 млрд руб. за единицу и др.

Нужно, также, в отношении примененных допущений пояснить, что применяемые для определения показателей эффективности и для построения графиков формулы (1–6), а также характерные соотношения основных показателей в системе отраслевых связей верфи с другими участниками, которые показаны в Таблице, являются методологическими приближениями, которые наиболее точно соответствуют описываемым показателям в предполагаемом условии, что субподрядчики верфи являются арендаторами ее производственных мощностей и несут операционные расходы, т.е. соотношения и формулы характеризуют наиболее точно эффективность активов судоверфи, работа, которой, и итоговый финансовый результат строятся на использовании этих активов.

Результаты определения прогнозных показателей: капитализации судостроительного предприятия ($RC_3 + NPV_3$) и чистой текущей стоимости (NPV_3), показанные на диаграмме помогают анализировать зависимость достигаемых и ожидаемых результатов создания судостроительной верфи для серийного модульного судостроения с учетом характерных отраслевых связей с судоходными компаниями, формирующими спрос в отношении продукции судостроения непосредственно или через партнеров.

Заключение

Потребность в создании специализированных судоверфей, предназначенных для сборки судов из модульных блоков и секций возникает поскольку для сокращения длительности постройки судов и затрат на строительство требуется технологическое кооперирование, при котором несколько корпусопроизводственных подразделений или

находящиеся в кооперации заводы могли бы работать совместно над общими заказами.

Дополнительные преимущества модульной технологии судостроения связаны с сокращением объема «замороженных» средств в незавершенном судостроении и возможности участия отдельных судостроительных заводов, изготавливающих части судна, в постройке крупнотоннажных судов (стандартным водоизмещением более 100 тыс. т) в партнерстве с верфями, способными осуществлять сборку и спуск судов этого размера.

Крупные сборочные верфи могут служить основой для формирования производственных объединений серийного судостроения, создаваемых, например, в форме технологически интегрированных холдингов, осуществляющих изготовление конструктивных модулей и их поставку на сборочную верфь, или в иной форме партнерской сети.

На дальнем Востоке модули, поставляемые на верфь для сборки серийных судов, могли бы производиться не только в Российской Федерации, а также, на судостроительных предприятиях в Китае, Республике Корея, в Японии, на Тайване, во Вьетнаме, в Сингапуре и в других странах.

То есть, возможно, как расположение корпусопроизводственных подразделений на смежной территории с судосборочной верфью, так и в разных пунктах с учетом транспортной доступности.

Возможности увеличения размера создаваемых судов, технологическим ограничением для которого выступают, главным образом, характеристики судосборочной верфи, соответствуют общей направленности в экологически чистом судостроении, поскольку суда большего размера (т.н. Green Ships) характеризуются меньшим расходом топлива и других ресурсов в расчете на перевозку единицы груза или на другую единицу функциональной эффективности.

Инновационное судостроение в тех или иных юрисдикциях обычно направлено на создание судов, которые недостаточно освоены серийным производством, поэтому локальный спрос в их отношении, например, национальный, превышает предложение, чем и обусловлена привлекательность этого сектора для инвестиций.

Постройка судов в соответствии с пилотными программами заказов, поступающими, например, со стороны инвесторов, осуществляющих создание судостроительной верфи, может служить первоначальной целью за рамками конкурентирования с судостроительными верфями, для которых характерно развитое серийное судостроение.

По мере накопления опыта работы судостроительной верфи, обновления и пополнения активов и по мере выполнения пилотных заказов, поступающих от инвесторов и учредителей вероятно изменение подхода и линейки заказов в соответствии с рыночным спросом, а также кооперирование в этих целях с судостроительными предприятиями, осуществляющими серийное судостроение.

Предприятия судостроения и судоходства находятся в системе отраслевых связей, при этом спрос в отношении новых морских гражданских судов, имеющий международный характер, формируется в морском судоходстве, которое служит источником инвестиций в судостроение как непосредственно, когда судно строится по заказу судоходной компании, так и опосредованно, если инвестиции поступают от партнеров, в качестве которых могут выступать ведомства или организации различного профиля, предварительно субсидирующие постройку судов, в том числе, финансовые учреждения, фонды и лизинговые компании, действующие в экономических интересах компаний судоходной отрасли, в конечном итоге.

Литература

1. Войлошников М.В. Модели оценки судов, активов морских предприятий и ресурсов океана: учеб. пособие. – М. : Общероссийская общественная организация «Российское общество оценщиков», 2010. – 361 с.
2. Огай С.А. Модели определения характеристик при создании многоцелевых судов для арктических и замерзающих морей : монография. – Владивосток : Дальнаука, 2018– 316 с.
3. Технология судостроения: учебник для студентов, обучающихся по направлению «Кораблестроение и океанотехника» / В.Л. Александров, А.В. Догадин, А.Р. Арью и Э.В. Ганов; под общ. ред. доц. А. Д. Гармашева. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 341 с.: ил.
4. David J. Eyres Ship construction. 6 edition – Butterworth–Heinemann, 2007. – 365 p.
5. Zvi Bodie, Alex Kane, Alan J. Marcus Essentials of Investments. Fourth Edition. – Irvin, McGraw–Hill, 2001.

References

1. Voyloshnikov M.V. Modeli ocenki sudov, aktivov morskikh predpriyatij i resursov okeana: ucheb. posobie. [The evaluation of commercial vessels, the marine company's assets and the ocean resources: textbook] – М. : Obshcherossiyskaya obshchestvennaya organizatsiya «Rossijskoe obshchestvo ocenshchikov», 2010. – 361 s.
2. Ogai S.A. Modeli opredeleniya harakteristik pri sozdanii mnogocelovykh sudov dlya arkticheskikh i zamerzayushchih morej : monografiya. [The models of determining of characteristics of multipurpose ships for Arctic and frozen seas: monodraph.] – Vladivostok : Dal'nauka, 2018. – 316 s.
3. Tekhnologiya sudostroeniya: uchebnyk dlya studentov, obuchayushchihsya po napravleniyu «Korablestroenie i okeanotekhnika» [The technology of ship-construction: the textbook for students training of the profession of «Shipbuilding and marine engineering»] / V.L. Aleksandrov, A.V. Dogadin, A.R. Ar'yu i E.V. Ganov; pod obshch. red. doc. A. D. Garmasheva. - Sankt-Peterburg : Professiya, 2003. – 341 s.: il.
4. David J. Eyres Ship construction. 6 edition – Butterworth–Heinemann, 2007. – 365 p.
5. Zvi Bodie, Alex Kane, Alan J. Marcus Essentials of Investments. Fourth Edition. – Irvin, McGraw–Hill, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION OF THE AUTHORS

Сергей Алексеевич Огай, доктор технических наук, доцент, профессор Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхне-портовая, д. 50–а, тел.: (423) 241–49–68; e–mail: ogay@msun.ru

Sergei A. Ogai, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Professor of Maritime state, university named Admiral Nevelskoi, 50–a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; tel.: (423) 241–49–68; e–mail: ogay@msun.ru

Михаил Владленович Войлошников, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Морской государственный университет, им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а; тел.: 8-914-705-6029, e–mail: michael.vladlen@gmail.com

Michael V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief research scientist of Maritime state, university named Admiral Nevelskoi, 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia; tel.: 8-914-705-6029 e–mail: michael.vladlen@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.069

УДК 514.8

Метод точного расчёта длины цилиндрической оболочки

А.А. Карпачёв¹

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. Как известно, для решения конкретных задач расчета прочности и устойчивости оболочек вращения используется теория расчетов осесимметричных тел вращения произвольной формы, основанная на гипотезах Кирхгофа и предположениях об однородности и изотропности материалов изготовления. В общей теории тонких оболочек данная задача сводится к решению системы уравнений равновесия в частных производных восьмого порядка. Для цилиндрических оболочек ввиду принятых допущений система уравнений равновесия в перемещениях преобразуется в линейную алгебраическую систему. Из данной системы на основе дополнительных допущений получают простое уравнение, из которого и определяется величина критического давления устойчивости по заданной длине оболочки. Однако из основной системы уравнений возможно решение обратной задачи: по заданной величине критического давления определять точное значение длины цилиндрической оболочки. При этом задача имеет точное решение без каких либо дополнительных допущений и упрощений системы уравнений.

Ключевые слова: устойчивость цилиндрических оболочек, критическое давление по устойчивости, алгебраическая система уравнений, алгебраические уравнения высших порядков

Method of exact calculation of length of cylindrical shell

Aleksandr A. Karpachev¹

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. As is known, to solve specific problems of calculating the strength and stability of shells of revolution, the theory of calculations of axisymmetric bodies of revolution of arbitrary shape is used, based on Kirchhoff hypotheses and assumptions about the homogeneity and isotropy of manufacturing materials. In the general theory of thin shells, this problem reduces to solving a system of eighth-order partial differential equilibrium equations. For cylindrical shells, in view of the accepted assumptions, the system of equations of equilibrium in displacements is transformed into a linear algebraic system. From this system, on the basis of additional assumptions, a simple equation is obtained, from which the critical pressure of stability for a given shell length is determined. However, it is possible to solve the inverse problem from the main system of equations: determine the exact value of the length of a cylindrical shell for a given critical pressure. Moreover, the problem has an exact solution without any additional assumptions and simplifications of the system of equations.

Key words: stability of cylindrical shells, critical pressure of stability, algebraic system of equations, higher order algebraic equations

Введение

Задача проектирования прочного корпуса оптимальной конструкции, т. е. обладающей достаточной прочностью при минимальном весе, для подводных аппаратов была исследована в ряде работ [1,2,3,4,7,8]. В большинстве практических случаев расчеты прочного корпуса основаны на методах расчета прочности и устойчивости цилиндрических оболочек вращения. Как правило, расчет прочности цилиндрической оболочки производится при следующих заданных параметрах:

l - длина, м;

r - внешний радиус, м;

H - глубина погружения, м;

K_3 - коэффициент запаса (больше единицы).

Кроме того, при расчетах используются необходимые физические и механические характеристики материала изготовления оболочки:

σ_T - предел текучести, H/M^2 ;

E - модуль упругости (Юнга), H/M^2 ;

μ - коэффициент Пуассона;

ρ_m - удельная плотность материала. $Kг/M^3$.

Вначале выполняется расчет толщины цилиндрической оболочки по прочности, (или по пластической устойчивости) по известной формуле:

$$\delta = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T} r, .$$

где P_p - расчётное давление, а $r = b - \delta/2$ - срединный радиус, а b - внешний радиус оболочки. Значение коэффициента запаса K_3 рекомендуется выбирать постоянным в интервале от 1,3 до 1,5. После подстановки этих значений уточняется толщина:

$$\delta = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T} (b - \delta/2) .$$

Отсюда определяется рабочая формула для расчета толщины оболочки:

$$\lambda = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T}; \quad \delta = \frac{\lambda \cdot b}{1 + 0,5\lambda} .$$

Далее рассчитывается срединный радиус r и a - внутренний радиус оболочки:

$$r = b - \delta/2; \quad a = b - \delta .$$

Определенная по формуле прочности толщина δ цилиндрической части оболочки еще не гарантирует её от разрушения. Как известно, гидростатическое

давление P_D , являясь внешним по отношению к оболочке, вызывает её обжатие. В результате возникают значительные сжимающие напряжения. В этих условиях параметры цилиндрической оболочки (корпуса) необходимо определять таким образом, чтобы величина критического давления $P_{кр}$ была не меньше величины расчетного давления P_D .

Задача определения устойчивости цилиндрических оболочек решалась многими авторами [2,5,8,9]. При этом отдельно рассматривались гладкие цилиндрические оболочки и оболочки, подкрепленные поперечными круговыми шпангоутами (внешними и внутренними). В каждом отдельном случае были получены соответствующие формулы для определения величины критического давления.

Для проверки цилиндрической оболочки на устойчивость необходимо рассчитать критическое давление P_{yc} , при котором оболочка не изменит своей формы, т.е. не подвергнется какой-либо деформации. Для расчёта этого давления существует несколько практических формул, например, зависящих от условного типа оболочки [9]. В зависимости от величины отношения l/r все оболочки делятся на типы:

- короткие, если $l/r < 3\sqrt{\delta/r}$;
- средние, если $3\sqrt{\delta/r} \leq l/r \leq 3\sqrt{r/\delta}$;
- длинные, если $l/r > 3\sqrt{r/\delta}$;

Для коротких оболочек величина P_{yc} рассчитывается по формуле:

$$P_{ycm} = \frac{\pi^2}{8(1-\mu^2)} \cdot \frac{E\delta^3}{r \cdot l^2}.$$

Для средних оболочек по формуле:

$$P_{ycm} = \frac{2\pi}{3\sqrt{6}(1-\mu^2)^{3/4}} \cdot \frac{E\delta^2}{r \cdot l} \sqrt{\delta/r}.$$

Для длинных оболочек по формуле:

$$P_{ycm} = \frac{E\delta^3}{4r^3(1-\mu^2)}.$$

В работах [7,8] приводится формула для расчёта давления, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрической оболочки, не подкрепленной шпангоутами:

$$P_{yc(n)} = \min_n \frac{\lambda^2 E \delta / b}{(0,5b/r + \mu)\lambda^2 + (1 + 0,5\mu b/r)n^2} \times \left[\frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + n^2)^2} + \frac{r^2}{12(1-\mu^2)r^2} \frac{(\lambda^2 + n^2)^2}{\lambda^2} \right]; \quad \lambda = \pi r/l.$$

Из условия устойчивости цилиндрической оболочки находят только приблизительно её длину по формуле:

$$l_{max} = 0,57 \left(\frac{\delta}{r} \right)^{3/2} \frac{Er}{\sigma_f (1-\mu^2)^{3/4}} = \eta \cdot 0,57 \cdot \delta \sqrt{\frac{\delta}{r}} \cdot K_M;$$

$$K_M = \frac{E}{\sigma_f (1-\mu^2)^{3/4}}.$$

Таким образом, данная величина является максимальной длиной цилиндрической оболочки, обеспечивающей её устойчивость без шпангоутов. Однако эта формула является, как уже было отмечено, очень приблизительной.

Сравнение результатов теоретических расчетов масс цилиндрических оболочек (корпусов) с фактическими массами прочных корпусов существующих подводных аппаратов показывает, что погрешность расчетных формул составляет до 15 % для диапазона глубин от 300 до 1000 м. и ниже. Для подводных аппаратов данная погрешность является существенной.

Основная система уравнений

Как известно, для решения конкретных задач расчета прочности и устойчивости оболочек вращения используется теория расчетов осесимметричных тел вращения произвольной формы, основанная на гипотезах Кирхгофа [2,5] и предположениях об однородности и изотропности материалов изготовления.

В общей теории тонких оболочек данная задача решается в перемещениях, при этом используется система трех уравнений равновесия [2,5], выраженная через усилия и моменты, которые, в свою очередь, определяются через относительные деформации срединной поверхности. После замены компонентов деформации перемещениями срединной поверхности оболочки приходят к системе трех уравнений равновесия с тремя неизвестными перемещениями u, v, w к интегрированию которой при заданных граничных условиях и сводится решение поставленной задачи.

Для цилиндрических оболочек была получена следующая система уравнений устойчивости относительно перемещений u, v, w [4,5]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} - \mu \frac{\partial w}{\partial \xi} + \\ & + \rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) = 0; \\ & \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \\ & + \theta \cdot \left((1-\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} \right) + \\ & + \rho \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} \right) = 0; \\ & \theta \cdot \left(\frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} - (2-\mu) \frac{\partial^3 v}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - \\ & - \frac{\partial v}{\partial \varphi} + w - \mu \frac{\partial u}{\partial \xi} + \rho \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) = 0. \end{aligned} \right.$$

где

$$\theta = \frac{\delta^2}{12r^2}; \quad p = \frac{P_{yc}}{E\delta} (1 - \mu^2).$$

Начало координат (x, φ) выбрано на ребре оболочки. Решение системы дифференциальных уравнений устойчивости ищется в виде произведений тригонометрических функций по переменным ξ и φ :

$$\begin{aligned} u &= A \cdot \cos(\lambda_m \xi) \cdot \cos(n\varphi); \\ v &= B \cdot \sin(\lambda_m \xi) \cdot \sin(n\varphi); \\ w &= C \cdot \sin(\lambda_m \xi) \cdot \cos(n\varphi). \\ \lambda_m &= m \cdot \pi r / l; \quad m, n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Функции v и w удовлетворяют очевидным граничным условиям:

$$v|_{\xi=0} = 0; \quad w|_{\xi=0} = 0.$$

После подстановки выражений для выбранных функций в основную систему уравнений устойчивости, и выполнения дифференцирования, группируются подобные по коэффициентам A, B, C . Каждое уравнение системы преобразуется в произведение, содержащее ненулевой множитель в виде произведения тригонометрических функций. После сокращения уравнений на ненулевые множители получается алгебраическая система уравнений относительно свободных коэффициентов A, B, C :

$$\begin{cases} A \left(-\lambda_m^2 - \frac{1-\mu}{2} n^2 + p n^2 \right) + B \left(\frac{1+\mu}{2} \lambda_m n + p \lambda_m n \right) + \\ + C (-\mu \lambda_m - p \lambda_m) = 0; \\ A \left(\frac{1+\mu}{2} \lambda_m n + p \lambda_m n \right) + \\ + B \left(-\frac{1-\mu}{2} \lambda_m^2 - n^2 - \theta (1-\mu) \lambda_m^2 - \theta n^2 + p \frac{1}{2} \lambda_m^2 \right) + \\ + C (n + \theta \lambda_m^2 n + \theta n^3) = 0; \\ A (\mu \lambda_m) + B (-\theta n^3 - \theta (2-\mu) \lambda_m^2 n - n + p n) + \\ C \left(\theta \lambda_m^4 + 2\theta \lambda_m^2 n^2 + \theta n^4 + 1 + p \cdot \left(-\frac{1}{2} \lambda_m^2 - n^2 \right) \right) = 0. \end{cases}$$

Именно из этой системы уравнений путём принятия дополнительных упрощающих допущений и было получено большинство расчётных формул для определения давления p , а затем и критического давления P_{yc} .

При потере устойчивости оболочкой может образоваться m полуволн синусоиды вдоль её образующей и n полуволн по её периметру. В работах [4,5] было показано, что минимальное значение критического давления, определяемое из этой системы, достигается при $m=1$. Заметим, что без каких либо упрощений указанная система может быть сведена к кубическому уравнению относительно величины давления. Далее выбирается наименьший действительный положительный корень, который зависит в общем случае от целого n . Решение достаточно простой задачи минимизации приводит к искомому значению параметра p . Далее с учётом принятых

обозначений определяется величина критического давления устойчивости:

$$P_{ycm} = \frac{p \cdot E \delta}{r (1 - \mu^2)}.$$

Давление P_{yc} и будет, очевидно, тем давлением, при котором заданная оболочка теряет устойчивость своей круговой формы.

Метод точного решения

Однако, приведённая система алгебраических уравнений допускает и решение обратной задачи: по заданному значению критического давления определить точное значение длины цилиндрической оболочки. Для этого достаточно привести систему уравнений к одному уравнению относительно параметра $\lambda = \lambda_1 = \pi r / l$, из которого и найти точное значение длины l . При этом величина критического давления по устойчивости считается известной.

Для удобства введём следующие обозначения для формирования матриц $\Lambda = \{\alpha_{ij}\}$ и $G = \{g_{ij}\}$, которые образуют основную матрицу системы:

$$\begin{cases} \alpha_{11} = -1; & \alpha_{12} = \left(\frac{1+\mu}{2} + p \right) n; & \alpha_{13} = (-\mu + p); \\ \alpha_{21} = \alpha_{12}; & \alpha_{22} = \left(-\frac{1-\mu}{2} - \theta (1-\mu) + \frac{p}{2} \right); & \alpha_{23} = \theta n; \\ \alpha_{31} = \mu; & \alpha_{32} = -\theta (2-\mu) n; & \alpha_{33} = \left(2\theta n^2 - \frac{p}{2} \right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_{11} = \left(-\frac{1-\mu}{2} + p \right) \cdot n^2; & g_{12} = 0; & g_{13} = 0; \\ g_{21} = 0; & g_{22} = -(1+\theta) \cdot n^2; & g_{23} = n(1+\theta n^2); \\ g_{31} = 0; & g_{32} = n(-1+p-\theta n^2); & g_{33} = \theta n^4 + 1 - p n^2. \end{cases}$$

В принятых обозначениях алгебраическая система уравнений устойчивости преобразуется в матричное уравнение третьего порядка:

$$\begin{pmatrix} g_{11} + \lambda^2 \alpha_{11} & g_{12} + \lambda \alpha_{12} & g_{13} + \lambda \alpha_{13} \\ g_{21} + \lambda \alpha_{21} & g_{22} + \lambda^2 \alpha_{22} & g_{23} + \lambda^2 \alpha_{23} \\ g_{31} + \lambda \alpha_{31} & g_{32} + \lambda^2 \alpha_{32} & g_{33} + \lambda^2 \alpha_{33} + \theta \lambda^4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = 0.$$

Эта система имеет два решения: либо все коэффициенты A, B, C равны нулю, что соответствует отсутствию потери устойчивости (так как все дополнительные перемещения u, v, w тоже равны нулю), либо равен нулю определитель матрицы системы, т.е. $\Delta = 0$.

На первый взгляд, кажется, что после раскрытия данного определителя получится алгебраическое уравнение восьмого порядка относительно параметра λ . Из свойства определителя суммы двух матриц при расщеплении первого столбца следует, что:

$$\Delta = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} + \lambda\alpha_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} + \lambda^2\alpha_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} + \lambda^2\alpha_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda \cdot \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & g_{12} + \lambda\alpha_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ \alpha_{21} & g_{22} + \lambda^2\alpha_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & g_{32} + \lambda^2\alpha_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix} =$$

$$= \Delta_1 + \lambda \cdot \Delta_2 = 0.$$

Раскладываем первый определитель Δ_1 , расщепляя его второй столбец:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ g_{21} & \lambda \cdot \alpha_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ g_{31} & \lambda \cdot \alpha_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix}.$$

Обозначим через $|G|$ определитель матрицы G .

Расщепляя в обоих определителях третьи столбцы, находим:

$$\Delta_1 = |G| + \lambda \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & \alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} & \lambda\alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} & \lambda\alpha_{33} + \theta\lambda^3 \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda \cdot \left\{ \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & g_{13} \\ g_{21} & \lambda\alpha_{22} & g_{23} \\ g_{31} & \lambda\alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} + \lambda \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ g_{21} & \lambda\alpha_{22} & \lambda\alpha_{23} \\ g_{31} & \lambda\alpha_{32} & \lambda\alpha_{33} + \theta\lambda^3 \end{vmatrix} \right\}.$$

Так как $g_{21} = g_{31} = 0$, то раскрыв теперь все определители по первым столбцам, получим:

$$\Delta_1 = |G| + \lambda \cdot \left[g_{11} \cdot \lambda \cdot \begin{vmatrix} g_{22} & \alpha_{23} \\ g_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + g_{11}g_{22}\theta\lambda^3 \right] +$$

$$+ g_{11} \cdot \lambda^2 \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{22} & g_{23} \\ \alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda^2 \cdot \left[g_{11}\lambda^2 \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + g_{11}\alpha_{22}\theta\lambda^4 \right].$$

Далее будем использовать стандартные обозначения алгебраических дополнений элементов матриц Λ и G , а в целях дальнейшего удобства будем символически обозначать через ΛG_{ij} - алгебраическое дополнение элемента первой строки матрицы третьего порядка с i -ой строкой и j -м столбцом. Причём первый столбец взят из матрицы Λ , а второй из матрицы G по следующей схеме:

$$\Lambda G_{11} = \begin{vmatrix} \alpha_{22} & g_{23} \\ \alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix}; \quad G\Lambda_{11} = \begin{vmatrix} g_{22} & \alpha_{23} \\ g_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}.$$

Теперь определитель Δ_1 можно записать так:

$$\Delta_1 = |G| + g_{11}(G\Lambda_{11} + \Lambda G_{11})\lambda^2 +$$

$$+ (g_{11}g_{22}\theta + g_{11}\Lambda_{11})\lambda^4 + g_{11}\alpha_{22}\theta\lambda^6.$$

Расщепляя второй определитель Δ_2 , по второму столбцу находим:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & g_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ \alpha_{21} & g_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & g_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda \cdot \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & \alpha_{12} & g_{13} + \lambda\alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \lambda\alpha_{22} & g_{23} + \lambda^2\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \lambda\alpha_{32} & g_{33} + \lambda^2\alpha_{33} + \theta\lambda^4 \end{vmatrix}.$$

Расщепляя в обоих определителях третий столбец, получим:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & g_{12} & g_{13} \\ \alpha_{21} & g_{22} & g_{23} \\ \alpha_{31} & g_{32} & g_{33} \end{vmatrix} + \lambda \cdot \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & g_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & g_{22} & \lambda\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & g_{32} & \lambda\alpha_{33} + \theta\lambda^3 \end{vmatrix} +$$

$$+ \lambda \cdot \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & \alpha_{12} & g_{13} \\ \alpha_{21} & \lambda\alpha_{22} & g_{23} \\ \alpha_{31} & \lambda\alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} + \lambda^2 \cdot \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \lambda\alpha_{22} & \lambda\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \lambda\alpha_{32} & \lambda\alpha_{33} + \theta\lambda^3 \end{vmatrix} =$$

$$= \Delta_{21} + \lambda \cdot \Delta_{22} + \lambda \cdot \Delta_{23} + \lambda^2 \Delta_{24}.$$

Так как $g_{12} = g_{13} = 0$, то раскрыв новые определители с двойными индексами по первым строкам, и используя принятые символические обозначения, можно записать:

$$\Delta_{21} = \lambda\alpha_{11} \begin{vmatrix} g_{22} & g_{23} \\ g_{32} & g_{33} \end{vmatrix} = \lambda\alpha_{11}G_{11};$$

$$\Delta_{22} = \lambda^2\alpha_{11} \begin{vmatrix} g_{22} & \alpha_{23} \\ g_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + \alpha_{13} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & g_{22} \\ \alpha_{31} & g_{32} \end{vmatrix} + \alpha_{11}g_{22}\theta\lambda^4 =$$

$$= \alpha_{13}\Lambda G_{13} + \alpha_{11}G\Lambda_{11}\lambda^2 + \alpha_{11}g_{22}\theta\lambda^4;$$

$$\Delta_{23} = \lambda^2\alpha_{11} \begin{vmatrix} \alpha_{22} & g_{23} \\ \alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} - \alpha_{12} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & g_{23} \\ \alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} =$$

$$= \alpha_{12}\Lambda G_{12} + \lambda^2\alpha_{11}\Lambda G_{11}.$$

Чуть более трудоёмким является вычисление следующего определителя:

$$\Delta_{24} = \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \lambda\alpha_{22} & \lambda\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \lambda\alpha_{32} & \lambda\alpha_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \lambda\alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 \\ \alpha_{21} & \lambda\alpha_{22} & 0 \\ \alpha_{31} & \lambda\alpha_{32} & \theta\lambda^3 \end{vmatrix} =$$

$$= \lambda\alpha_{11}\lambda^2 \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} - \alpha_{12}\lambda \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + \alpha_{13}\lambda \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} +$$

$$+ \theta\lambda^3 [\lambda^2\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}].$$

Или, используя символические обозначения:

$$\Delta_{24} = (\alpha_{12}\Lambda_{12} + \alpha_{13}\Lambda_{13}) \cdot \lambda + (\alpha_{11}\Lambda_{11} - \alpha_{12}\alpha_{21}\theta) \cdot \lambda^3 +$$

$$+ \alpha_{11}\alpha_{22}\theta \cdot \lambda^5.$$

Собирая полученные выражения для определителей с двойными индексами, находим формулу для вычисления определителя Δ_2 :

$$\Delta_2 = (\alpha_{11}G_{11} + \alpha_{12}\Lambda G_{12} + \alpha_{13}\Lambda G_{13}) \cdot \lambda + (\alpha_{11}G_{11}\Lambda + \alpha_{11}\Lambda G_{11} + \alpha_{12}\Lambda_{12} + \alpha_{13}\Lambda_{13}) \cdot \lambda^3 + (\alpha_{11}g_{22}\theta + \alpha_{11}\Lambda_{11} - \alpha_{12}\alpha_{21}\theta) \cdot \lambda^5 + \alpha_{11}\alpha_{22}\theta \cdot \lambda^7.$$

После подстановки полученных выражений для определителей Δ_1 и Δ_2 , и дальнейшего приведения подобных вычисляется основной определитель системы, который приравняется нулю:

$$\Delta = |G| + [g_{11}(G\Lambda_{11} + \Lambda G_{11}) + \alpha_{11}G_{11} + \alpha_{12}\Lambda G_{12} + \alpha_{13}\Lambda G_{13}] \cdot \lambda^2 + [g_{11}g_{22}\theta + g_{11}\Lambda_{11} + \alpha_{11}G\Lambda_{11} + \alpha_{11}\Lambda G_{11} + \alpha_{12}\Lambda_{12} + \alpha_{13}\Lambda_{13}] \cdot \lambda^4 + [g_{11}\alpha_{22}\theta + \alpha_{11}g_{22}\theta + \alpha_{11}\Lambda_{11} - \alpha_{12}\alpha_{21}\theta] \cdot \lambda^6 + [\alpha_{11}\alpha_{22}\theta] \cdot \lambda^8 = 0.$$

Итак, получено действительно алгебраическое уравнение восьмого порядка относительно искомой величины λ . Как известно, такие уравнения в общем случае неразрешимы в радикалах. Однако нетрудно заметить, что это уравнение содержит только чётные степени λ .

Понятно, что это алгебраическое уравнение восьмого порядка относительно искомого параметра λ легко приводится к уравнению четвёртого порядка после очевидной замены:

$$\chi = \lambda^2.$$

Для дальнейшего удобства уравнение делится на ненулевую величину $Z = \alpha_{11}\alpha_{22}\theta$ и вводятся обозначения для коэффициентов нового алгебраического уравнения четвёртого порядка. Заметим, что в общем случае все коэффициенты зависят от значения n (число полуволн по периметру оболочки):

$$a_0 = |G|/Z; \\ a_1 = [g_{11}(G\Lambda_{11} + \Lambda G_{11}) + \alpha_{11}G_{11} + \alpha_{13}\Lambda G_{13}]/Z; \\ a_2 = [g_{11}g_{22}\theta + g_{11}\Lambda_{11} + \alpha_{11}G\Lambda_{11} + \alpha_{11}\Lambda G_{11} + \alpha_{12}\Lambda_{12} + \alpha_{13}\Lambda_{13}]/Z; \\ a_3 = [g_{11}\alpha_{22}\theta + \alpha_{11}g_{22}\theta + \alpha_{11}\Lambda_{11} - \alpha_{12}\alpha_{21}\theta]/Z.$$

Таким образом, получается достаточно простое приведённое алгебраическое уравнение четвёртого порядка относительно неизвестной величины χ :

$$\chi^4 + a_3\chi^3 + a_2\chi^2 + a_1\chi + a_0 = 0.$$

Как известно, в общем случае алгебраические уравнения четвертой степени разрешимы в радикалах. Решив это уравнение наиболее простым методом Феррари, находим его корни. Необходимо сделать следующее замечание. В методе Феррари решение исходного уравнения сводится к решению кубического уравнения, которое имеет три корня. При этом один из корней всегда будет действительным. Именно его и следует выбирать для формирования двух квадратных уравнений, из решения которых и определяются корни уравнения четвёртой степени. Согласно теореме Абеля существует четыре корня

этого уравнения. При этом возможны только три случая:

- существуют четыре действительных корня;
- существуют одна пара действительных корней и одна пара сопряжённых комплексных корней;
- существует две пары сопряжённых комплексных корней.

В первом и втором случаях существуют действительные корни. Исходя из практических соображений, необходимо искать наименьшую длину оболочки. Так как длина цилиндрической оболочки и параметр λ связаны обратной зависимостью, то из всех корней выбирается наибольший положительный корень (χ_n) и вычисляется искомая величина длины оболочки по формуле:

$$l(n) = \pi r / \chi_n.$$

В третьем случае считаем, что решения для данного значения n не существует, и переходим к следующему значению $n+1$. При многих вычислительных экспериментах в практических примерах этот случай не был установлен.

Понятно, что длина $l(n)$ зависит от целого n . Решение задачи минимизации величины $l(n)$ осуществляется простым перебором для $n=1, 2, 3, \dots, N$, до первого значения N , для которого $l(N) < l(N+1)$, и не занимает много времени. Значение N , как правило, не превышает 10.

Таким образом, определяется минимальное значение, которое объявляется точной длиной цилиндрической оболочки:

$$l = \min_n l(n).$$

Вышеизложенный алгоритм был реализован в программе – приложение Excel в виде алгоритмической функции $l = EC(\zeta, P, r, \delta, E, \mu)$.

Обсуждение

Основное уравнение $\Delta = \det(G + \Lambda) = 0$ связывает между собой главные параметры цилиндрической оболочки, такие как, её длина, срединный радиус, толщина и величину критического давления, при которой оболочка подвергается деформации, приводящей к её разрушению. Из перечисленных параметров только задача определения длины оболочки при условии задания остальных величин приводит к необходимости решения алгебраического уравнения четвёртой степени:

$$\chi^4 + a_3\chi^3 + a_2\chi^2 + a_1\chi + a_0 = 0.$$

В этом уравнении коэффициенты являются функциями от остальных величин. Используя предложенный подход, можно прогнозировать значения таких рабочих параметров, как коэффициенты материалов изготовления самой цилиндрической оболочки, т.е. решать задачи по поиску оптимальных коэффициентов σ, E, μ, ρ идеального материала изготовления оболочки при всех остальных заданных параметрах.

Заметим, что раскрытие уравнения $\Delta = 0$ требует определённых усилий. Однако предлагаемый подход

значительно упрощает вывод алгебраического уравнения относительно исследуемого параметра, а точность результата оправдывает все затраченные усилия.

Заключение

Предлагаемый метод точного расчёта длины цилиндрической оболочки по заданной величине критического давления по устойчивости, реализованный функцией $EC(\zeta, P, r, \delta, E, \mu)$, является адекватным существующим практическим формулам, и при этом обеспечивает повышенную точность вычислений от 5 до 15% для различных расчётных глубин. Точность повышается с увеличением расчётной глубины.

Метод достаточно прост в реализации на любом языке программирования и проверен в среде Excel при проведении обширных вычислительных экспериментов.

Алгоритмическая функция $EC(\zeta, P, r, \delta, E, \mu)$, не требует ограничений на отношения l/r , или каких – либо других ограничений и допущений. В рамках допущения Кирхгофа функция является универсальной, т.е. она применима для расчёта длины цилиндрических оболочек по критическому давлению по устойчивости прочных корпусов, как подводных лодок, так и торпед, контейнеров и других глубоководных подводных аппаратов.

Литература

1. Илларионов Г. Ю., Карпачев А. А. К вопросу о расчете оболочек вращения произвольной формы переменной толщины //12 Дальневосточная научно-техн. конф.: Тез. докл. – Владивосток: ДВГТУ, Прим. кр. Правление НТОС им. ак. А. Н. Крылова, 1995. – С. 93-97.
2. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек.– Л.: Судпромгиз, 1951. – 344 с.
3. Подводные роботы и их системы: Сб. статей /Под ред. академика Агеева М. Д. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 109 с.
4. Соломенко Н. С., Румянцев Ю. Н. Строительная механика подводных лодок. – Л., ВВМИОЛУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1962. – 400 с.
5. Пикун В.В. Механика оболочек. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 536 с.
6. Пикун В.В. К теории устойчивости оболочек // ДАН, 2007. – Т. 416. - № 3. – С. 341.

References

1. Illarionov G. YU., Karpachev A. A. K voprosu o raschete obolochek vrashcheniya proizvol'noj formy peremennoj tolshchiny [On the issue of calculating shells of rotation of arbitrary shape of variable thickness]. //12 Dal'nevostochnaya nauchno-tekhn. konf.: Tez. dokl. – Vladivostok: DVG TU, Prim. kr. Pravlenie NTOS im. ak. A. N. Krylova, 1995. – S. 93-97.
2. Novozhilov V. V. Teoriya tonkih obolochek [Theory of Thin Shells].– L.: Sudpromgiz, 1951. – 344 s.
3. Podvodnye roboty i ih sistemy [Underwater robots and their systems].: Sb. statej /Pod red. akademika Ageeva M. D. – Vladivostok: Dal'nauka, 1995. – 109 s.
4. Solomenko N. S., Rumyancev YU. N. Stroitel'naya mekhanika podvodnyh lodok [Submarine Building Mechanics]. – L., VVMIOLU im. F. E. Dzerzhinskogo, 1962. – 400 s.
5. Pikul' V.V. Mekhanika obolochek [Mechanics of Shells]. – Vladivostok: Dal'nauka, 2009. – 536 s.
6. Pikul' V.V. K teorii ustojchivosti obolochek [On the theory of shell stability]. // DAN, 2007. – T. 416. - № 3. – S. 341 – 343.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Афанасьевич Карпачёв, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика» Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: k327063@yandex.ru

Aleksandr A. Karpachev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Director of department of Mathematics, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia, e-mail: k327063@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.070

УДК 629.12

Сравнение требований российского морского регистра судоходства и финско-шведских правил к ледовым классам

О.Э. Сузов¹, М.В. Китаев¹, С.В. Каленчук¹, А.И. Мамонтов¹¹Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Освоение ресурсов Арктики приводит к конкуренции в области проектирования и постройки судов ледовых классов, а также к необходимости совершенствования и корректировки требований ведущих классификационных обществ. До недавнего времени ведущие классификационные общества имели собственные требования к ледовым классам. В настоящее время ведущие иностранные классификационные общества включили в свои правила Балтийские ледовые классы, соответствующие требованиям Финско-Шведских Правил для судов ледового класса и Полярные ледовые классы, соответствующие Унифицированным требованиям международной ассоциации классификационных обществ. Собственную ледовую классификацию судов, ориентированную на ледовые условия канадской Арктики сохранило только Американское бюро судоходства. Исходя из сложившихся тенденций, имеет смысл сравнивать требования правил Российского морского регистра судоходства к ледовым классам, не с требованиями правил конкретных иностранных классификационных обществ, а непосредственно с требованиями Финско-Шведских Правил и Унифицированными требованиями международной ассоциации классификационных обществ. Принимая во внимание тот факт, что подавляющее большинство вводимых в строй судов с ледовым классом имеют балтийские классы, то на данном этапе исследования целесообразно выполнить сопоставление требований к ледовым классам Правил Российского морского регистра судоходства и Финско-Шведских Правил.

Ключевые слова: ледовые классы, классификационные общества, сравнение требований, ледовые усиления, форма корпуса, ледовые нагрузки.

Comparison of the requirements of russian maritime register of shipping and finnish-swedish rules for ice classes

Oleg E. Surov¹, Maksim V. Kitaev¹, Sergey V. Kalenchuk¹, Andrey I. Mamontov¹¹Far Eastern Federal University

Abstract. The development of Arctic resources leads to competition in shipbuilding industry and ice class vessels design, as well as to development and updating the requirements of classification societies. Until recently the classification societies had their own requirements for ice classes. Nowadays the leading foreign classification societies have included in their rules the Baltic ice classes that correspond to the requirements of the Finnish-Swedish Rules for ice class ships and the Polar ice classes that correspond to the unified requirements of the International Association of Classification Societies. Nonetheless the American Bureau of Shipping retained its own ice classification of ships, oriented to the ice conditions of the Canadian Arctic. Based on the global trends it is obvious to compare the Russian register of shipping rules with the requirements of the Finnish-Swedish Ice class rules and Unified Requirements for polar ships. The most of modern ice class vessels have the Baltic Finnish-Swedish Ice classes than reasonable to compare the requirements of Russian register of shipping rules with the requirements of the Finnish-Swedish Ice class rules.

Key words: ice classes, classification societies, requirements, ice reinforcements, hull form, ice loads.

Введение

До недавнего времени ведущие иностранные классификационные общества (ИКО) в дополнение к требованиям Финско-Шведских Правил (Finnish-Swedish Ice Class Rules, далее FSR) [1] и унифицированным требованиям международной ассоциации классификационных обществ (УТ МАКО) [2] имели собственные требования к различным ледовым классам.

В 2008 г. GL, а затем DNV (после слияния с GL и издания совместных правил DNV-GL) и LR исключили из правил собственные ледовые классификации. Только Американское бюро судоходства (American Bureau of Shipping, далее ABS), сохранило ледовую классификацию судов, ориентированную на условия канадской Арктики.

В настоящее время ведущие ИКО включили в свои правила следующие ледовые классы:

- Балтийские ледовые классы, соответствующие требованиям FSR. Применяются к судам, эксплу-

тирующимся в условиях Балтийского моря в зимний период, а также в акваториях других неарктических морей с подобными ледовыми условиями.

- Полярные ледовые классы, соответствующие УТ МАКО. Применяются к судам, предназначенным для самостоятельного плавания в арктических и антарктических водах.

В настоящем исследовании представлены результаты сравнения требований правил Российского морского регистра судоходства (РС) [3] с требованиями правил FSR к ледовым классам.

Выбор размерного ряда судов для сравнения

Требования правил РС и FSR к судам ледовых классов основаны на разных подходах к определению ледовых нагрузок и принципах нормирования прочности судовых конструкций. Ряд факторов, учитываемых в одних правилах, не учитывается в других. Сравнение правил РС и FSR на примере единичных судов будет некорректным.

Более достоверную информацию можно получить, сравнивая требования правил на примере размерного ряда однотипных судов, составленного в максимально широком диапазоне их главных размерений. В качестве размерного ряда был выбран размерный ряд нефтеналивных судов, строящихся в наиболее широком диапазоне длин (от 40-50 м для танкеров-бункеровщиков и до 380 м для танкеров класса ULCC) имеющих, несмотря на большую разницу в размерах, схожую форму и конструкцию. Значительная часть этих судов, начиная с танкеров-бункеровщиков и заканчивая танкерами класса Suezmax, имеет ледовый класс вплоть до **Ice(1A)**, а в некоторых случаях и **Ice(1A*)**.

На основании обширного статистического материала был построен размерный ряд танкеров, в диапазоне длин от 50 до 320 м. При выполнении сопоставительных расчетов размерный ряд ограничивался длиной 270 м (водоизмещение ~ 200 000 т), соответствующей танкерам класса Suezmax. Более крупные танкеры классов VLCC и ULCC строятся без ледовых усилений.

В сопоставительных расчетах рассматривался стандартный, в плане конструктивного исполнения, "конвенционный" танкер с двойным дном и двойными бортами, с носовым бульбом и одним винтом фиксированного шага.

Требования к форме корпуса

Правила FSR не предъявляют требований к форме корпуса, тогда как правила РС нормируют для рассматриваемых ледовых классов ряд параметров, представленных в табл. 1.

Таблица 1
Нормируемые параметры формы корпуса по требованиям правил РС [3]

Параметр формы корпуса	Ледовый класс		
	Arc5	Arc4	Ice3, Ice2, Ice1
Угол наклона форштевня на уровне летней ГВЛ ϕ , не менее	45	60	-
Угол наклона летней ГВЛ на носовом перпендикуляре α_0 , не менее	40	40	50
Угол наклона шпангоута на уровне летней ГВЛ на расстоянии $0.05L$ от носового перпендикуляра β , не менее	25	20	-
В носовом и промежуточном районах ледовых усилений судов ледовых классов Arc5, Arc4 наружная обшивка не должна принимать значения $\beta = 0$ и $\alpha > 0$			

Средне и крупнотоннажные танкеры, начиная с класса MR ($L = 170-175$ м, $\Delta \sim 60$ 000 т), а иногда при меньших размерах, имеют U-образную форму шпангоутов в подводной части практически по всей длине носовой оконечности независимо от наличия ледового класса FSR, как показано на рис.1.

Жесткое соблюдение требований правил РС об исключении районов наружной обшивки с $\beta = 0$ и $\alpha > 0$ для ледовых классов Arc5, Arc4 связано со значительной модификацией носовой оконечности

таких танкеров, что делает ледовую классификацию РС менее привлекательной по отношению к FSR.

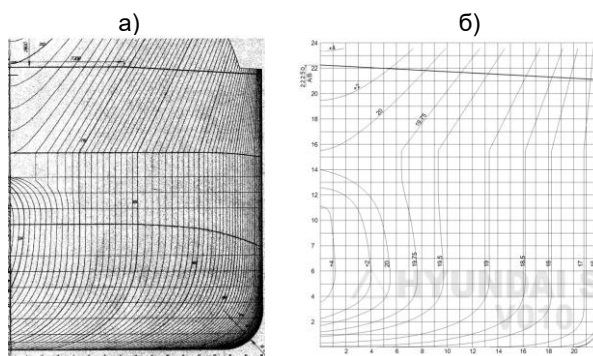


Рис. 1. Стандартная форма корпуса средне и крупнотоннажных танкеров: а) MR; б) LR-II (Aframax)

В свою очередь, требование правил УТ МАКО к форме корпуса выглядит следующим образом: "Для судов, которым присваивается полярный класс PC1 – PC5, носовая оконечность судна с вертикальными бортами и бульбообразная носовая оконечность должны, как правило, избегаться."

Протяженность районов ледовых усилений

Существенное различие требований правил FSR и РС к расположению и протяженности районов ледовых усилений, является главной причиной невозможности установления точной эквивалентности ледовых классов (рис. 2).

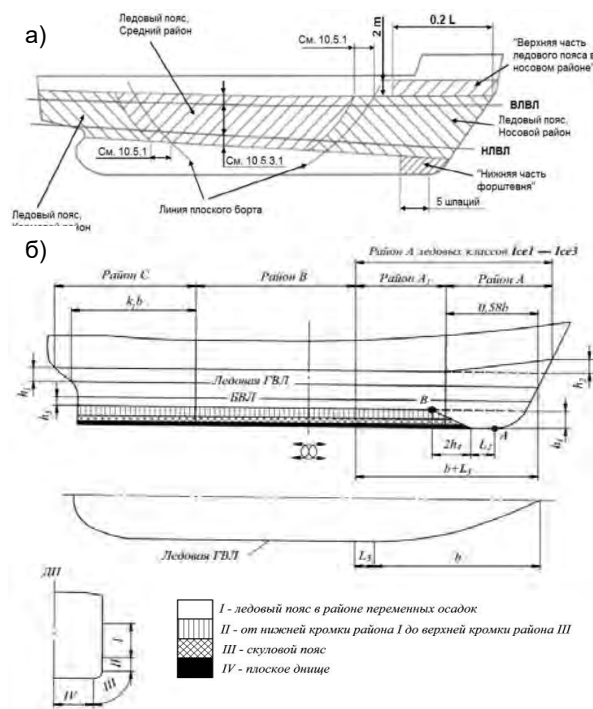


Рис. 2. Районы ледовых усилений судов ледового плавания по правилам FSR и РС

Для ледовых классов правила FSR по длине корпуса выделяют ледовый пояс в районе переменных осадок, который разделяется на носовой, средний и кормовой районы (кроме класса IceC для которого выделяется только носовой

район). Границы между районами привязаны к носовой и кормовой линиям плоского борта и могут иметь наклон относительно вертикали.

Другие усиления корпуса ниже ледового пояса правилами FSR не предусмотрены, что компенсируется введением ограничений по осадке судна в балласте. Согласно этим ограничениям винт должен полностью оставаться под поверхностью воды, и, если возможно, полностью подо льдом. Так, правила МАРПОЛ 73/78 обеспечивают в корме минимальное заглубление винта под поверхность воды, а не льда. Регламентируемая правилами МАРПОЛ 73/78 балластная осадка в носу обеспечивает выполнение требований правил FSR до ледового класса Ice(1A) включительно.

Правила РС как и правила FSR по всей длине корпуса выделяют ледовый пояс в районе переменных осадок (район I), который делится на носовой (A1), промежуточный (A1l – для ледовых классов Arc4 и выше), средний (B1) и кормовой (C1) районы (для класса Ice1 выделяется только носовой район A1). Границы между районами основаны на принципе выделения плоского борта в качестве среднего района. В правилах РС в отличие от FSR эти границы не параллельны линиям плоского борта, а задаются вертикально.

Для танкеров с U-образными обводами носовой оконечности носовая граница плоского борта располагается вертикально, в этом случае требования правил FSR и РС по разграничению носового и среднего районов усиления совпадают. Однако для танкеров с V-образными обводами носовой оконечности носовая линия плоского борта может иметь наклон к вертикали 60° и более. В этом случае в носовой район усиления по требованиям правил РС для низких (неарктических) ледовых классов не попадает участок борта в районе балластных осадок, для которого $\alpha > 0$.

Учитывая, что район перехода носовой ветви ватерлинии в цилиндрическую вставку отличается повышенной повреждаемостью, имеет смысл гармонизировать требования правил РС в части разграничения носового и среднего районов усиления с требованиями правил FSR, а также УТ МАКО, которые в данном вопросе совпадают.

Результаты сравнения площадей ледового пояса в районе переменных осадок для ледовых классов РС и FSR для сопоставимых ледовых классов представлены на рис. 3.

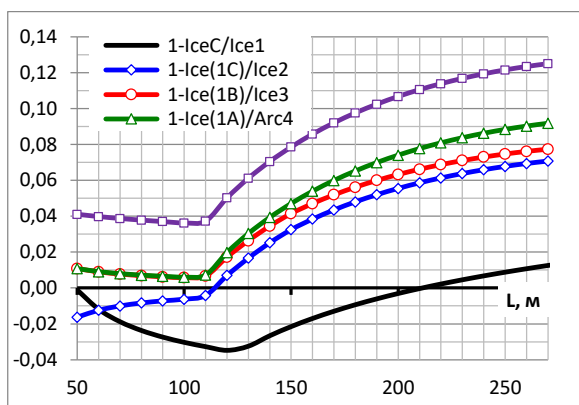


Рис.3. Сопоставление площадей ледового пояса в районе переменных осадок по РС и FSR

Из рис. 3 следует, что с повышением ледовых классов и габаритов судов наблюдается устойчивый рост требований правил РС к протяженности ледового пояса в районе переменных осадок по отношению к требованиям правил FSR. Для пары Ice(1A*)-Arc5 превышение требований правил РС над FSR составляет 4-12%.

Дополнительно к ледовому поясу в районе переменных осадок правила РС относят участки обшивки выше и ниже ледового пояса в носовом районе (за исключением ледового класса Ice1), а также начиная с категории Ice3, дополнительных районов ледовых усиления, охватывающих борт ниже района I (район II), скулу (район III) и плоское днище (район IV), что увеличивает разницу между ледовыми классами РС и FSR.

Параметры ледовой нагрузки

В правилах FSR ледовая нагрузка характеризуется интенсивностью p , высотой h [1].

Принципиальным отличием правил FSR от правил РС является то, что интенсивность ледовой нагрузки в них связана с мощностью главных двигателей P , которая должна быть не менее минимальной P_{min} , достаточной для движения судна со скоростью 5 узлов в канале при толщине битого льда посередине канала H_M не менее:

$$H_M = 0.6 \text{ м для ледового класса Ice(1C);}$$

$$H_M = 0.8 \text{ м для ледового класса Ice(1B);}$$

$$H_M = 1.0 \text{ м для ледового класса Ice(1A);}$$

$H_M = 1.0 \text{ м для ледового класса Ice(1A*)}$ при толщине замерзшего верхнего слоя 0,1 м.

Высота ледовой нагрузки h в правилах FSR в пределах каждого ледового класса не зависит от характеристик судов. Ее величина принимается как часть характерной для каждого ледового класса толщины ровного сплошного льда h_0 и лежит в диапазоне 0,22-0,35 м.

Увеличение мощности главных двигателей по отношению к минимальной мощности позволяет судну развить при движении во льдах большую скорость, что с точки зрения правил FSR приводит к повышению интенсивности ледовой нагрузки.

В правилах РС ледовая нагрузка характеризуется интенсивностью p , высотой b и длиной l^H распределения ледовой нагрузки. Форма эпюры нагрузки в явном виде не оговаривается.

Параметры ледовой нагрузки в носовом A1 и промежуточных A1l районах ледовых усиления регламентируются правилами РС в соответствии с выбранными базовыми опасными режимами движения (БОРД) и основываются на зависимостях, вытекающих из гидродинамической модели удара тела о лед (ГДМ). Для судов ледового плавания БОРД строятся для прямого удара о льдину. Для среднего B1 и кормового C1 районов усиления судов ледового плавания такая методология, строго говоря, не применима. Для преодоления указанной ситуации Е.М. Апполоновым [4] предложено включить в правила РС возможность регламентации размеров сложных пространственных конструкций на основе прямых расчетов прочности на ледовую нагрузку трапецевидной формы.

Примеры расчетов интенсивности p и высоты ледовой нагрузки b по правилам FSR и РС представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 4 следует, что зависимость интенсивности ледовой нагрузки от водоизмещения в правилах FSR и PC имеет сходный характер, однако величина ледовых нагрузок по правилам FSR в большинстве случаев превышает уровень нагрузок по правилам PC.

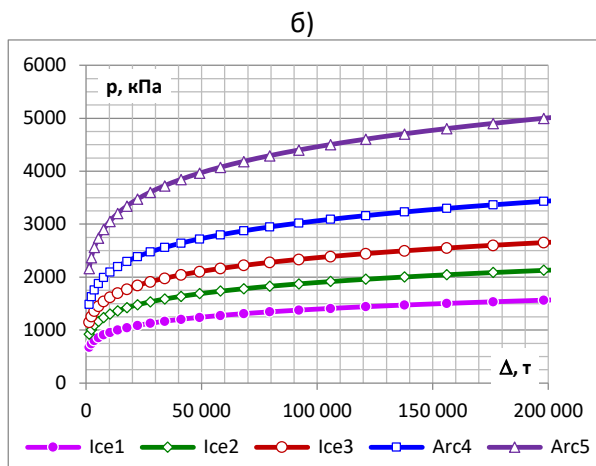
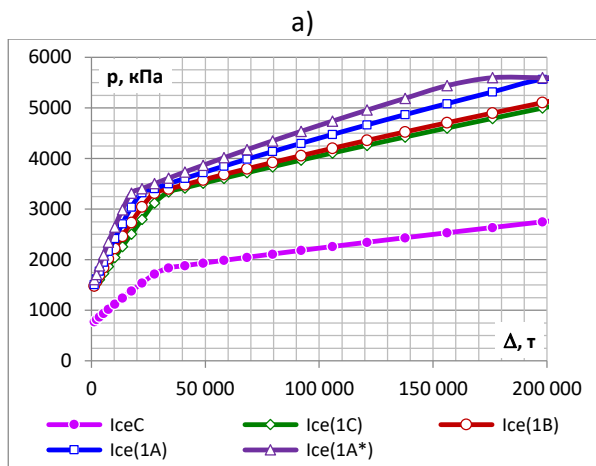
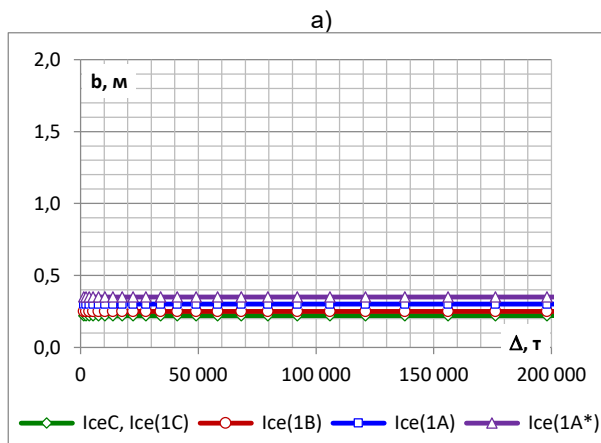


Рис. 4. Интенсивность ледовой нагрузки по правилам FSR (а) и PC (б) для района AI

Более значительные отличия наблюдаются в отношении высоты ледовой нагрузки (см. рис. 5).



б)

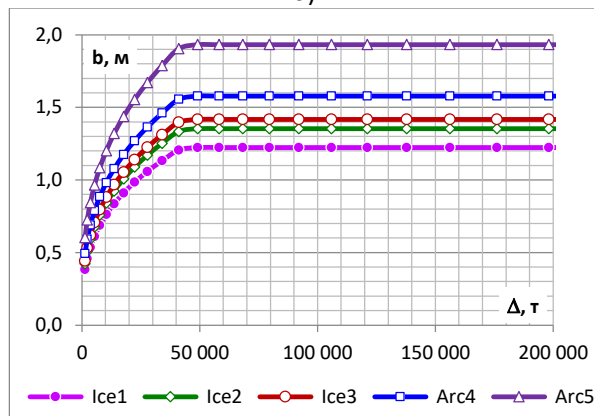


Рис. 5. Высота ледовой нагрузки по правилам FSR (а) и PC (б)

Так, в правилах FSR в пределах каждого ледового класса высота ледовой нагрузки не зависит от характеристик судов и района ледовых усилений, а принимается как часть характерной для каждого ледового класса толщины ровного сплошного льда и лежит в диапазоне $0,22 \div 0,35$ м. В правилах PC высота ледовой нагрузки увеличивается с ростом водоизмещения до

$\Delta \sim 50\,000$ т, после чего стабилизируется на уровне:

1.2 ÷ 1.9 м для района AI;

0.95 ÷ 1.4 м для района BI;

0.76 ÷ 1.1 м для района CI.

Указанные величины превышают толщины льда, приведенные в описании ледовых классов PC, что связано с включением в БОРД случая удара с малой скоростью о толстую льдину (торос).

Для среднего BI и кормового CI районов усилений судов ледового плавания данная методология, строго говоря, не применима. Однако с учетом меньшей повреждаемости для этих районов приняты аналогичные зависимости, а ледовые нагрузки постепенно (с учетом 20% снижения в 2003 г.) учитывают опыт эксплуатации.

Закключение

Средне и крупнотоннажные танкеры имеют U-образную форму шпангоутов в подводной части в носовой оконечности независимо от ледового класса. Требования PC об исключении районов наружной обшивки с $\beta = 0$ и $\alpha > 0$ для ледовых классов Arc5, Arc4 делает ледовую классификацию РМРС менее привлекательной по отношению к требованиям Финско-Шведских Правил, которые не предъявляют требований к форме корпуса.

В УТ МАКО требования в форме корпуса представлены следующим образом: "Для судов, которым присваивается полярный класс PC1 – PC5, носовая оконечность судна с вертикальными бортами и бульбообразная носовая оконечность должны, как правило, избегать". С учетом выше изложенного, необходимо включить в правила РМРС аналогичную оговорку - "как правило".

Различие требований правил FSR и РМРС к расположению и протяженности районов ледовых усилений не позволяет установить эквивалентность ледовых классов. Для танкеров с U-образными обводами носовой оконечности граница плоского борта располагается вертикально. В этом случае требования FSR и РС по разграничению носового и среднего районов усилений практически совпадают. Для судов с V-образными обводами носовой оконечности носовая линия плоского борта может иметь наклон к вертикали 60° и более. В этом случае в носовой район усилений по требованиям РМРС для неарктических ледовых классов не попадает участок борта в районе балластных осадков, для которого $\alpha > 0$. Кроме того, район перехода носовой ветви ватерлинии в цилиндрическую вставку отличается повышенной повреждаемостью. Исходя из этого, целесообразно гармонизировать требования правил РМРС в части разграничения носового и среднего районов усилений с FSR и УТ МАКО. Также

необходимо гармонизировать положение границы между средним и кормовым районами ледовых усилений.

Начиная с Ice3 правила РМРС выделяют дополнительные районы ледовых усилений, охватывают борт ниже района I (район II), скулу (район III) и плоское днище (район IV). Таким образом введение районов усилений II-IV для арктического ледового класса Arc5 и переходного ледового класса Arc4 вполне оправдано.

Выделение района All для судов класса Ice3 с позиции опыта эксплуатации не очевидна и обусловлена необходимостью плавного роста протяженности ледовых усилений с переходом от одного класса к другому. В целях повышения привлекательности правил РМРС необходимо рассмотреть возможность отказа от района All для класса Ice3, либо уменьшить его протяженность.

Статья подготовлена в рамках Договора с РМРС № 18-99519 от 09.06.2018 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. DNV GL rules for classification: Ships (RU-SHIP). Part 6 Additional class notations. 2018 г.
2. Международная ассоциация классификационных обществ. Символика классификации судов. Справочник. НД № 2-029901-002, СПб, 2015.– 85 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть I Классификация. НД № 2-020101-104. Санкт-Петербург, 2018 г.
4. Разработка предложений по оптимизации и упрощению конструктивных требований, алгоритма определения расчетных ледовых нагрузок и проектирования конструкций ледовых усилений судов высших ледовых категорий по Правилам РС: Науч.-техн. отчет по этапу 1 договора № РС-16/2006 / Руководитель Е.М. Апполонов. СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2006. 49 с.

References

1. DNV GL rules for classification: Ships (RU-SHIP). Part 6 Additional class notations. 2018.
2. International Association of Classification Societies. Symbols of classification of ships. Directory. ND № 2-029901-002, SPb, 2015.– 85 p.
3. Rules for the classification and construction of ships. Part I Classification. ND № 2-020101-104. Sankt-Peterburg, 2018.
4. Development of proposals for the optimization and simplification of design requirements, an algorithm for determining design ice loads and designing ice reinforcement structures for vessels of higher ice categories according to RS Rules: Scientific-technical. report on stage 1 of contract No. RS-16/2006 / Head E.M. Appolonov. SPb .: Central Research Institute named after Academician A.N. Krylova, 2006. 49 p

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Суров Олег Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 6, С 614, e-mail: surov.oye@dvfu.ru

Oleg E. Surov, Ph.D. (Eng)., Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: surov.oe@dvfu.ru

Китаев Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 729, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Maksim V. Kitaev, Ph.D. (Eng)., Associate professor, the Head of Shipbuilding and Ocean Engineering Department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Каленчук Сергей Всеволодович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 719, e-mail: leka230243@gmail.com

Мамонтов Андрей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 730, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

Sergey V. Kalenchuk, Ph.D. (Eng)., associate professor, the chief engineer of JSC "Far Eastern Shipbuilding and Ship Repair Center" 690091, Vladivostok, st. Svetlanskaya, 72 e-mail: skalenchuk@mail.ru

Andrey I. Mamontov, Ph.D. (Eng)., Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.080

УДК 629.12

Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт)

В.А. Кулеш¹, А.И. Азовцев¹¹Дальневосточный федеральный университет, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Грузовые операции с судов на необорудованный берег являются важной частью поддержания и развития инфраструктуры многих регионов, особенно арктических, Сибири и Дальнего Востока. В 2017 году Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства дополняются новой главой для судов классов NAABSA. В работе рассмотрены вопросы применения требований новой главы к судну в эксплуатации. Показано, что новая глава Правил обеспечивает принципиальную возможность повышения надёжности новых судов, взаимодействующих с грунтом. Однако, некоторые положения Правил нуждаются в уточнениях и дополнениях. На примере конкретного судна предложены усиления днища, форштевня и ахтерштевня. Особое внимание для опыта классификации судов в эксплуатации должно уделяться расчётным обоснованиям ограничений и мероприятий для повышения безопасности.

Ключевые слова: суда на грунте, требования, опыт классификации

Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground)

Victor A. Kulesh¹, Anatoly I. Azovtsev¹¹Far Eastern Federal University, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy

Abstract. Cargo operations from ships to non-equipped shore are an important part of maintaining and developing the infrastructure of many regions, especially the Arctic, Siberia and Far East. In 2017 year Rules for the Classification and Construction of Ships of the Russian Maritime Register of Shipping are supplemented by a new chapter for ships of the class NAABSA. The paper deals with the application of the requirements of the new chapter to the vessel in operation. It is shown that the new chapter of the Rules requirements a fundamental opportunity to increase the reliability of new ships interacting with the ground. However, some provisions of the Rules need clarifications and additions. On the example of a specific vessel, reinforcements of the bottom, stem, and stern are proposed. Particular attention for classification experience vessels in operation should be given to the design justifications for restrictions and measures to improve safety.

Keywords: NAABSA ships, requirements, classification experience

Введение

Грузовые операции на необорудованный берег с применением судов являются неотъемлемой частью поддержания и развития инфраструктуры многих регионов. Особую важность они имеют для арктических и восточных районов России, включая Сибирь и Дальний Восток. Многолетняя практика выработала определенный набор решений в отношении используемых объектов и технологии проведения таких операций. Но до недавнего времени Российский морской регистр судоходства (РМРС) не рассматривал сценарии контактов судов с грунтом как эксплуатационные случаи. Факт контакта судна с грунтом рассматривался как аварийный случай, после которого документы Регистра теряли силу, а их восстановление требовало внеочередного докового освидетельствования. В итоге, факты проведения грузовых операций судов на необорудованных берегах не получали отражения в судовых документах. Последствия контактов судов с грунтом при отсутствии регламента могли быть тяжёлыми.

28 октября 2012 года появилось сообщение о гибели в Охотском море судна «Амурская» и всех членов экипажа. Анализ аварии показал, что гибели судна предшествовала операция обсушения и загрузки в условиях приливо-отливной зоны необорудованного берега портопункта Киран. Вес принятого груза не был проконтролирован и получился чрезмерным. В результате перегруза судно не смогло всплыть во время прилива. В таких случаях на помощь приходит гусеничная техника

(чаще бульдозеры) в качестве толкателей. В результате операции столкновения судна набор корпуса получил серьёзные повреждения и не смог выдержать последующего воздействия штормовых условий на переходе в пункт назначения.

Данная авария ужесточила надзор и условия проведения подобных операций и требования к судам. При этом, из-за старения и списания небольших самоходных плашкоутов проекта 698, возник дефицит транспортных средств в ДВ регионе. Начались закупки подержанных, более крупных и не приспособленных к обсушке судов за рубежом.

19 февраля 2014 года во Владивостоке состоялось совещание специалистов ДВФУ и МГУ им. адм. Г.И. Невельского на тему «Развитие транспортной инфраструктуры Дальневосточного федерального округа на основе разработки и совершенствования правил и нормативно-технических документов проектирования и эксплуатации морской техники для условий отсутствия портов». По результатам обсуждения совещание подтвердило актуальность комплексного решения вопросов (по судам, местам обсушения и технологиям операций) для ДВ округа и рекомендовало выйти с предложениями в государственные структуры и к возможным инвесторам.

26 ноября 2014 года в Санкт-Петербурге состоялось заседание секции Научно-технического совета РМРС, где был представлен доклад на тему «О нормативно-технических вопросах обеспечения специализированных судов для погрузки-выгрузки с использованием принципа осушения». Доклад

вызвал интерес и обсуждение. Признана актуальность поставленных вопросов. По итогам секции руководство РМРС принимает решение о включении такой НИР в план Регистра.

В апреле 2015 года Циркулярным письмом № 340-21-810ц РМРС вносит изменения в часть II «Периодичность и объёмы освидетельствований» Правил классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. Среди прочих включён пункт 2.5.4.4.1 применительно к судам, которые эксплуатируются в режиме NAABSA: Not Always Afloat But Safely Aground – не всегда на плаву, но безопасно на грунте. Отмечено, что «Способность судна эксплуатироваться в режиме NAABSA подтверждается управлением классификации Главного управления Регистра на основании соответствующего расчётного обоснования и отмечается в классификационном свидетельстве». Аббревиатура NAABSA заимствована у иностранных классификационных обществ.

В ноябре 2015 года результаты НИР [1] представлены Регистру. Предложено три уровня классов NAABSA 1, 2, 3 и соответствующие регламентирующие требования по прочности корпуса, остойчивости и оборудованию. Результаты также изложены в работе [2]. Рекомендована дальнейшая процедура апробации предложений в форме Нормативно-методических материалов (НММ), которые были опубликованы в 2016 году [3]. Характерный срок апробации НММ обычно доходит до 5 лет, включает последующее обобщение опыта применения и разработку окончательной редакции для её включения в Правила.

Осенью 2017 года Регистр Циркулярным письмом № 314-26-1047 от 12.10.2017 включает текст НММ в раздел 11 части XVII «Дополнительные знаки символов ...» Правил классификации и постройки. В настоящее время это 15 раздел указанной части [4]. Таким образом, внедрение в Правила прошло практически без апробации. Причиной ускоренного внедрения главы в Правила могут быть интересы судовладельцев.

В конце 2017 года в ГУ Регистра поступил первый комплект документации по NAABSA, подготовленной по заказу судовладельца. Регистр рассмотрел документацию и оговорил недостаточный объём расчётных обоснований по прочности.

В данной работе представлено обобщение опыта и проблем приложения новой главы Правил к небольшому сухогрузному судну японской постройки, используемому для разгрузки-погрузки на необорудованный западный берег полуострова Камчатка в условиях устьев рек, соответствующих классу NAABSA1.

1. Описание судна и корпуса

Объектом анализа является небольшое судно водоизмещением 1110 т, расчётной длиной 53 м, шириной 9,5 м, высотой борта 5,4 м и осадкой 3,28 м. Судно предназначено для перевозки генеральных (в том числе навалочных) грузов и построено в 1995 году в Японии. Оно представляет собой морское, стальное, одновинтовое, двухпалубное, с двойным дном и двойными бортами (до уровня 2 палубы), кормовым расположением машинного отделения, бульбообразным носом и транцевой кормой судно. Общие виды судна показаны на рис. 1. Судно имеет

один грузовой трюм с размерами люка 30,0×7,5 м и не имеет собственных грузовых устройств.

Корпус имеет смешанную систему набора: двойное дно и верхняя палуба в районе грузовой зоны набраны по продольной системе, остальные конструкции – по поперечной. Поперечная шпация составляет 600 мм в районе 22 – 73 шп. и 550 мм других районах. Продольная шпация составляет 625 мм для двойного дна. Днище имеет килеватость с подъёмом у бортов до 200 мм.

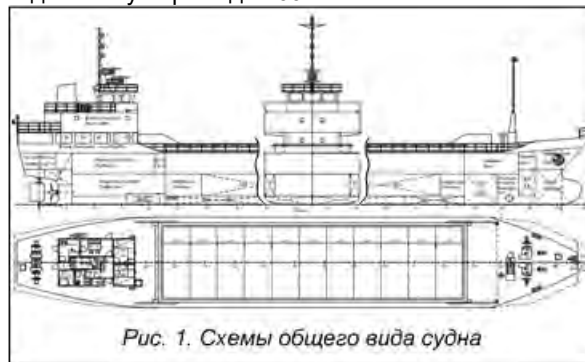


Рис. 1. Схемы общего вида судна

Толщина горизонтального киля 12 мм, обшивка днища - 9 мм, настил второго дна - 16 мм. Продольные балки двойного дна из уголка 100×75×7 с пролетом до 4 шпаций – 2,4 м, в центре пролёта соединяются стойками. Бракеты толщиной 7 мм в районе скулы располагаются на каждом шпангоуте, а в районе киля через 2 шпации. Флоры и днищевые стрингеры толщиной 8 мм. Стрингеры располагаются на 1,875 м от ДП. Вертикальный киль толщиной 9 мм.

С позиции посадки судна на грунт наличие килеватости днища определяет положение судна без крена как неустойчивое. Вопросы продольной, поперечной и местной прочности рассмотрены ниже.

2. Расчётные нагрузки

Расчётные давления, кПа, на конструктивные элементы, непосредственно воспринимающие действие грунта, определяются по формуле [4]

$$p_i = 10d_N(1 + 4/\sqrt{A_i})k_p, \quad (1)$$

где d_N - осадка на миделе, соответствующая расчётному водоизмещению, м; A_i - площадь зоны деформирования элемента, м²; k_p - коэффициент запаса.

Расчётные давления для пластин обшивки, днищевых балок и панелей рамного набора представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Расчётные давления для пластин обшивки

Местоположение	Размеры, м		Давление, кПа
	Вдоль	Поперёк	
Скула	0,600	0,900	211
У киля	1,200	0,625	184
Прочие	2,400	0,625	140

Таблица 2

Расчётные давления для балок днища

Местоположение	Размеры зоны, м		Давление, кПа
	Вдоль	Поперёк	
5-я от ДП	0,600	1,250	184
1-я от ДП	1,200	1,250	140
2 – 4 от ДП	2,400	1,250	109

Таблица 3
Расчётные давления для панелей рамного набора

Местоположение	Размеры, м		Давление, кПа
	Вдоль	Поперёк	
Скуловая бракета	0,600	0,500	409
Бракета у В. киля	1,200	0,625	276
Стрингер и ВК	0,600	1,875	235
Флоры	2,400	0,625	210

Статические концевые реакции, кН, грунта на корпус судна определяются по формуле

$$R_N^m = g\Delta_N \left[\frac{\text{tg}(\psi_N - \psi_0 - \psi_S)}{6} \cdot \frac{L}{d_N} \right], \quad (2)$$

где Δ_N - расчётное водоизмещение, т; ψ_N - угол наклона грунта вдоль судна, град.; ψ_0 - угол конструктивного дифферента; ψ_S - угол эксплуатационного дифферента.

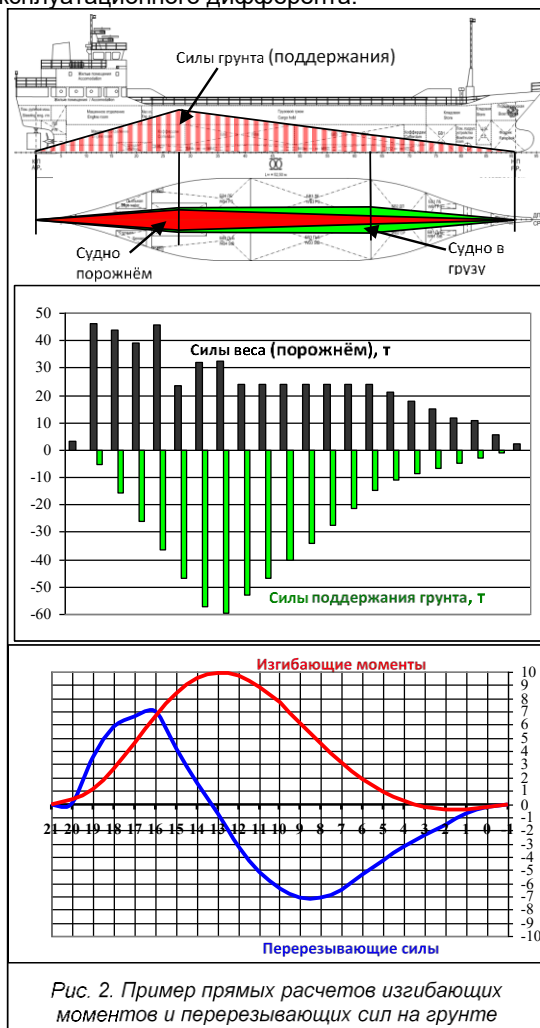


Рис. 2. Пример прямых расчетов изгибающих моментов и перерезывающих сил на грунте

Значения по формуле (2) для судов класса NAABSA1 не должны приниматься менее

$$R_N^m = 3g\Delta_N / 12 = 2725 \text{ кН}. \quad (3)$$

Расчётная нагрузка со стороны грунта для проверки поперечной прочности отсека

$$Q_{0S} = k_\phi R_N L_{OS} / L_{BN} = 9342 \text{ кН}, \quad (4)$$

где $k_\phi = 1,5$; $R_N = g\Delta_N = 10899 \text{ кН}$; $L_{OS} = 30 \text{ м}$ – длина отсека/трюма судна; $L_{BN} = 52,5 \text{ м}$ – расчётная длина днища.

Расчётное значение изгибающего момента при прогибе на тихой воде определено пересчётом с прототипов и составило

$$M_{SW} = -k_M g\Delta_N L = - 5745 \text{ кН·м}. \quad (5)$$

Изгибающий момент для корпуса судна от носовой концевой реакции грунта

$$M_N = -0,363 \cdot \Delta_N L = - 21258 \text{ кН·м}, \quad (6)$$

В результате суммарный расчётный изгибающий момент для корпуса судна при прогибе составил

$$M_{SW} + M_N = - 27000 \text{ кН·м}, \quad (7)$$

что в 1,5 раза больше, чем при перегибе.

Значения по формулам (6) и (7) завышены. Более точные значения можно определить путем классического представления сил веса и поддержания грунта с интегрированием.

Проблема заключается в том, что ширина зоны контакта в разных сечениях по длине судна переменная и подлежит определению. Она зависит от килеватости днища и сопротивления грунта. Для решения такой задачи приняты следующие допущения:

1. Расчетное сопротивление грунта равномерно по площади зоны контакта.
2. Величина сопротивления грунта 100 кПа - достаточная для работы колесной техники.
3. Веса судна и грузов симметричны относительно ДП (посадка без крена).
4. Влияние гибкости корпуса не учитывалось.
5. Форма пятна зоны контакта с грунтом представлена приближённо в форме вытянутого многогранника, рис.2.

За неизвестные параметры принимаются ширины зоны контакта на кормовой и носовой границе среднего района корпуса судна.

Для оценки неизвестных параметров принятой расчётной модели зоны контакта необходимо удовлетворить двум условиям равновесия:

1. Площадь зоны контакта обеспечивает равенство сил веса и сил поддержания.
2. Центры тяжести судна и площади зоны контакта лежат на одной вертикали.

Пример решения такой задачи для судна порожнём, когда перегиб наибольший, показан на рис.2. Наибольший изгибающий момент при этом составляет $+10 \text{ МН·м} = 10000 \text{ кН·м}$, что в 1,8 раза меньше нормативного значения по [4]. Наибольшая ширина зоны контакта достигает 2,3 м. В состоянии полной и равномерной загрузки судна наибольшая ширина доходит до 3 м.

Наличие килеватости днища делает положение судна без крена неустойчивым. Более устойчивым является положение судна с креном, равным углу килеватости. В таком случае наибольшая ширина зоны контакта доходит до 5 м, соответственно почти в 2 раза снижаются давления грунта.

3. Общая прочность

Согласно [4] проверка общей продольной прочности производится по предельному моменту сопротивления корпуса при наихудшем случае прогиба – сочетании изгибающего момента от концевой реакции (6) и изгибающего момента на тихой воде (5). Допускаемый остаточный предельный момент сопротивления поперечного сечения корпуса на конец срока службы должен быть не менее

$$W_I(\bar{A}_i) = 1,1 \cdot \frac{|0,92M_N + M_{sw}|}{R_{eH}} \cdot 10^3, \quad (8)$$

где R_{eH} - верхний предел текучести, МПа.

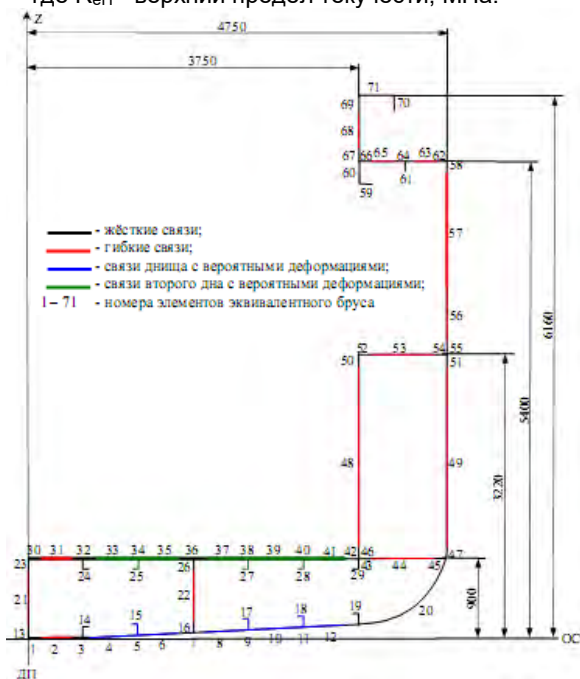


Рис. 3. Схема эквивалентного бруса с выделением связей для расчёта предельной

Требуемое значение момента сопротивления по формуле (8) равно $118400 \text{ см}^3 = 1184 \text{ см}^2 \cdot \text{м}$.

Расчётные остаточные предельные моменты сопротивления для палубы и днища определяются на конец срока службы. Схема эквивалентного бруса приведена на рис.3 и включает особенности. В первую очередь выделены «жёсткие» связи. Затем выделены «гибкие» связи, которые исключаются из состава эквивалентного бруса в предположении потери устойчивости при их сжатии. При растяжении они остаются в составе эквивалентного бруса. Также выделены пластины обшивки и продольные балки днища, которые предположительно будут деформированы и исключаются из состава эквивалентного бруса по этой причине. Кроме того, выделены пластины обшивки и продольные балки настила второго дна, которые также могут быть деформированы.

Расчеты выполнены как для нового корпуса, так и при износах всех связей на 30%. В результате учёта износа и исключения конструктивных связей остаточная площадь поперечного сечения эквивалентного бруса составила 28,4% от построечного значения. Результаты расчётов:

- для палубы

$$W_I = \frac{J}{H_m - e} = \frac{6275\bar{n} \cdot 2_i^2}{6,16 - 1,768i} = 1429\bar{n} \cdot 2_i \quad (9)$$

- для днища

$$W_{\bar{A}_i} = \frac{J}{e} = \frac{6275\bar{n} \cdot 2_i^2}{1,768i} = 3549\bar{n} \cdot 2_i \quad (10)$$

Таким образом, при наибольшем весе судна условия предельной общей прочности корпуса обеспечиваются на уровне палубы с запасом 21%, а на уровне днища – 200%.

4. Поперечная прочность отсека

Согласно [4] проверка прочности рамного набора днищевого перекрытия должна быть выполнена на основании расчётов перекрытия как стержневой системы. Наименьшей прочностью обладает днищевое перекрытие в районе грузового трюма. Расчетная нагрузка для этого перекрытия определена по формуле (4). Расчётные приведённые напряжения не должны превышать допускаемые: 160 МПа – для флоров, 128 МПа – для стрингеров и кия.

Расчёты прочности грузового отсека судна на указанную нагрузку выполнены методом конечных элементов (МКЭ). Расчётная нагрузка грунта прикладывалась к балкам главного направления – флорам на участке между стрингерами. На рис.4 представлена расчетная модель половины грузового отсека и эпюры приведенных напряжений для существующей конструкции и при наибольшем весе судна.

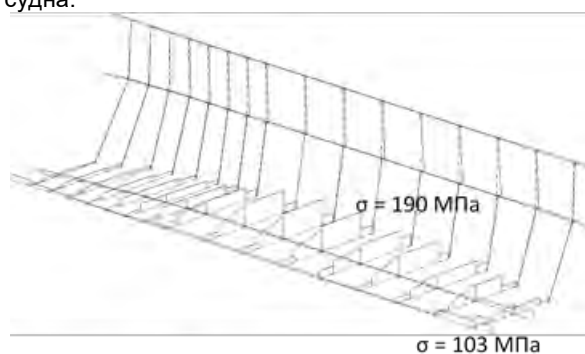


Рис. 4. МКЭ - модель грузового отсека и наибольшие приведённые напряжения в связях

Расчёты показали, что уровень напряжений в стрингерах и вертикальном киле меньше допускаемого. Наибольшие напряжения в средних флорах перекрытия 190 МПа и на 19% превышают допускаемые. Снижение напряжений возможно путем подкреплений, например дополнительными полуфлорами. Так, в случае полуфлоров из полосульба №24а, уровень напряжений снижается до 112 МПа и прочность обеспечена. Снижение напряжений также обеспечено, если ввести ограничение на вес судна при посадках на грунт или если учитывать сценарий посадки на грунт с креном.

5. Прочность панелей на смятие

Согласно [4] толщины панелей стенок вертикального кия, днищевых стрингеров, флоров и бракет должны быть проверены на соответствие минимальным толщинам, а также толщинам, требуемым по условиям смятия на основе принципов ледовой главы Правил. Расчёты показали, что требования к минимальным толщинам выполняются.

Анализ показал, что сложные формулы ледовой главы Правил можно представить в упрощённом виде:

- если рёбра жесткости перпендикулярны к обшивке

$$s_{E0} = s_1 \cong 0,80 \cdot k_1 pb / R_{eH} \quad (11)$$

- если ребра не перпендикулярны или отсутствуют

$$s_{E0} = s_2 = 0,95 \cdot k_1 pb / R_{eH} \quad (12)$$

где b - расстояние между кромками листовых связей (интервал), м; $k_1=1,3$ – как для неарктических судов; p - расчётное давление грунта, см. табл.3.

Расчёты показали, что по условиям смятия стенок набора построечные толщины существенно (до 2 раз) превышают требования (11) и (12).

6. Толщины наружной обшивки

Пластины горизонтального киля, обшивки днища и скулы имеют отличия по размерам и системам набора. Поэтому требования к их толщинам должны определяться раздельно. Согласно Правил требуемая толщина наружной обшивки (мм) определяется по формуле

$$s = 15,8ak_\alpha \sqrt{\frac{k_p p}{k_\sigma R_{eN}}} \cdot m_n^{-1} \quad (13)$$

где a - размер меньшей стороны пластины, м; b - размер большей стороны пластины, м;

$k_\alpha = (1 - \alpha + \pi\alpha/6)/(1 - \alpha + \pi\alpha/2)$ - коэффициент соотношения сторон; $\alpha = a/b$; $k_p = 1,5$ - коэффициент запаса прочности (при отсутствии внешней защиты); p - расчётные давления грунта, см. табл.1; k_σ - коэффициент допускаемых напряжений: 0,95-0,42L/100 - при поперечной системе, 0,9 - в других случаях; $m_n = 0,75$ - коэффициент остаточной толщины (при отсутствии внешней защиты).

Результаты расчётов и сравнений толщин наружной обшивки днища представлены в табл.4. Они показывают, что требования в районе скулы и киля выполняются. Пластины днища, где флоры установлены через 4 шпации, не удовлетворяют требованиям. В случае установки дополнительных полуфлоров требование с 10 мм снижается до 8,7 мм и построечная толщина 9 мм удовлетворяет.

Таблица 4

Требуемые и построечные толщины обшивки

Местоположение	Толщины, мм		Кoeff. запаса
	Требов.	Постр.	
Скула	8,5	9	1,06
У киля	8,7	12	1,38
Средние	10,0	9	0,90

7. Прочность днищевых балок

Днище судна в районе продольной системы набора (грузового отсека) включает продольные балки одного профиля - уголок 100·75·7, но разных пролетов. Крайние (5-е от ДП) балки имеют пролёт 1 шпацию и опираются на скуловые бракетки. Балки 1-е от ДП имеют пролёт 2 шпации, опираясь на флоры и бракетки ВК. Промежуточные балки (2, 3 и 4 от ДП) имеют пролёт 4 шпации, они опираются на флоры и в середине пролета поддерживаются стойками, связывающими их с балками второго дна.

Результаты расчётов и сравнений предельных моментов сопротивлений поперечных сечений балок днища представлены в табл.5. Они показывают, что требования в районе скулы и киля выполняются. Балки днища с пролетами 4 шпации не удовлетворяют требованиям.

Таблица 5

Расчёты для балок днища

Местоположение	Моменты, сопр., см ³		Кoeff. запаса
	Требов.	Постр.	
5-я от ДП	19,9	99,8	2,26
1-я от ДП	88,9	99,8	1,12
2 – 4 от ДП	197,0	99,8	0,51

В случае установки дополнительных полуфлоров требование 197 см³ снижается до 88,9 см³ и построечные значения удовлетворяют.

8. Прочность ахтерштевня

Согласно [4] принятые размеры поперечных сечений ахтерштевня должны быть проверены на основании прямого расчёта прочности. Расчётная нагрузка принята равной величине концевой реакции грунта 2725 кН по формуле (3). Коэффициент допускаемых напряжений 0,68.

Расчёты прочности ахтерштевня при посадке на грунт показали, что пятка ахтерштевня прогибается на 1,8 мм, а наибольшие напряжения в её основании 434 МПа значительно превышают допускаемые 160 МПа. Таким образом, по результатам расчётов необходимо усиление ахтерштевня.



Принципиальная схема возможного усиления ахтерштевня показана на рис.5 и включает замену существующей бракетки на бракетку больших размеров, толщины и напряжений текучести. Расчёты для такого варианта усиления показали возможность обеспечения прочности.

9. Прочность форштевня

Согласно [4] принятые размеры поперечных сечений форштевня должны быть проверены на основании расчёта криволинейной балки переменного сечения с опорами на палубах, платформах и поперечных переборках. Расчётная нагрузка равна величине концевой реакции грунта 2725 кН по формуле (3). Коэффициент допускаемых напряжений 0,68.

По результатам расчётов показано, что при

принятых конструктивных размерах связей и параметрах прочность форштевня в опорном сечении не обеспечивается. Напряжения в районе нижнего опорного сечения существенно превышают допускаемые $386 > 160$ МПа. В данном случае предел текучести принят 235 МПа как для обычной углеродистой стали. Для повышения и обеспечения прочности требуется подкрепление.

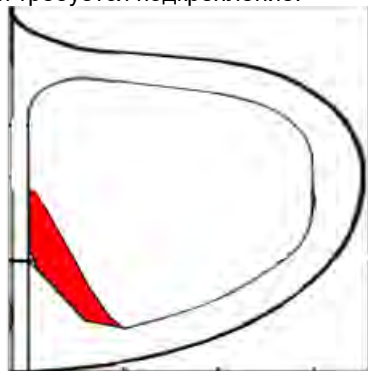


Рис. 6. Схема усиления форштевня путём наращивания существующей brackets

Принципиальная схема возможного усиления форштевня показана на рис.6 и сводится к наращиванию параметров brackets в районе перехода форштевня в вертикальный киль. Расчёты для такого варианта усиления показали возможность обеспечения прочности.

10. Обсуждение

Результаты данной работы показали, что существующая редакция Правил обеспечивает принципиальную возможность для проектирования новых специализированных судов повышенной надёжности. При этом имеются недостатки.

1. Уточнения требуются в части учёта формы носовых бульбов.

2. В части проверки толщин стенок на смятие приём ссылки на ледовую главу Правил не является удачным и приводит к неопределённостям, например, коэффициенты зависят от уровня ледового класса (у данного судна его нет).

3. Регламент границ районов усиления не дифференцирован по классам NAABSA и для класса NAABSA1 положение верхней границы представляется завышенным.

4. Влияние килеватости днища и условия посадки судна на грунт с креном в главе не оговариваются.

Неустойчивость и крен рассмотренного судна на грунте из-за килеватости днища (рис.7) не является критичной, так как грузовые операции выполняются береговыми средствами.

Повышение устойчивости на грунте судов с килеватостью возможно путем установки внешней конструктивной защиты (фальшкилей), рис.8. Это позволяет сконцентрировать воздействия грунта на районах повышенной прочности.

Возможным альтернативным способом повышения устойчивости килеватых судов на грунте является профилирование формы поверхности грунта. В данном случае это выемка грунта на величину килеватости 0,2 м и шириной до 7 м (рис.9). Нагрузка перераспределяется на три зоны – вдоль горизонтального килля и в районе скул. Эти зоны на большинстве судов имеют повышенную прочность.



Рис. 7. Пример положения на грунте килеватого судна с креном на правый борт

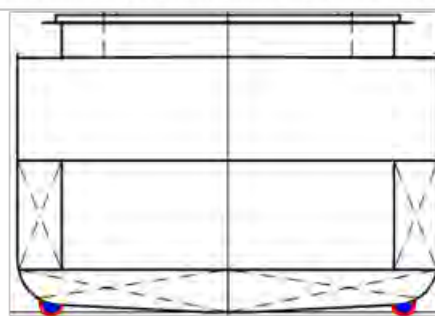


Рис. 8. Вариант повышения устойчивости судна на грунте

Эффективным способом повышения местной прочности на грунте является использование жидкого балласта, который первоначально обеспечивает необходимый крен судну, а затем по мере осушения его уровень повышается для создания противодействия грунту (рис.10). Для рассмотренного судна противодействие может достигать 60 кПа, что составляет 43% и 55% от расчётных давлений на обшивку и днищевые балки, соответственно, в наиболее слабых районах.

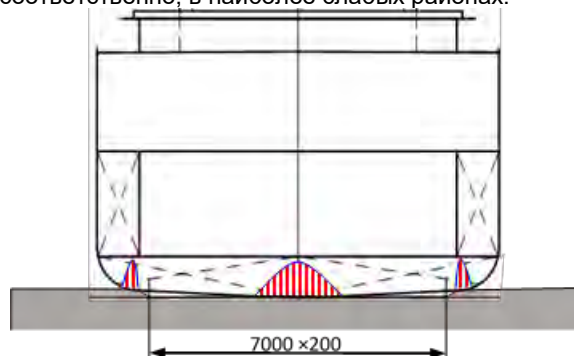


Рис. 9. Вариант повышения устойчивости судна путём профилирования поверхности грунта

Применение требований [4] к судам в эксплуатации без ограничений может приводить к значительным затратам на модернизацию. Например, вариант установки дополнительных флоров на рассмотренном судне оценён в 95% от общей стоимости на модернизацию. Переход к варианту с полуфлорами и проработкой технологии работ (рис.11) позволяет снизить затраты. Тем не менее затраты велики и создают предпосылки для отказа от модернизации с целью получения символа класса NAABSA.

К недостаткам главы [4] можно отнести отсутствие дифференцирования концевых реакций - носовой и кормовой, а также чрезмерное влияние ограничения по формуле (3),



Рис. 10. Вариант использования балласта для крена и противодействия грунту

не зависящего от углов грунта и дифферента. Анализ посадок судна по случаям из Информации об остойчивости позволяет установить связь состояний загрузки и эксплуатационных дифферентов. На рис.12 показано, что кормовая реакция грунта в худшем случае (грунт горизонтальный - 0°) не превысит 1300 кН, что значительно меньше ограничения 2725 кН.



Рис. 11. Технологические вырезы для установки деталей полуфторов внутри двойного дна

Аналогичные расчёты для носовых концевых реакций представлены на рис. 13. Они показывают, что ограничение (3) соответствует случаям осушения судна на пляжах с уклоном более 7°. Практически уклоны в местах осушения менее 5° и величина носовой реакции 2725 кН не относится к реальным сценариям.

Для судов, находящихся в эксплуатации, наиболее значимым в перспективе может быть ограничение по весу при взаимодействии с грунтом. Правила оговаривают, что для судов NAABSA «допускается частичное или полное обсушение ...», а их расчётное водоизмещение для посадки на грунт «... во всех случаях не более водоизмещения по летнюю грузовую ватерлинию». Частичное обсушение или ограничение по весу (водоизмещению) судна ведут к снижению силового взаимодействия с грунтом. Проблема с позиции Регистра заключается в том, что не всегда ясны условия контроля выполнения установленных ограничений и других мероприятий в местах и в процессе взаимодействия судов с грунтом. Однако это не должно быть сдерживающим фактором для применения положений новой главы Правил к действующим судам. Регистр присваивает ледовые классы, но не может контролировать реальные

ледовые условия. Регистр устанавливает судам ограничения по районам плавания и волнению, но не осуществляет контроль по ним.

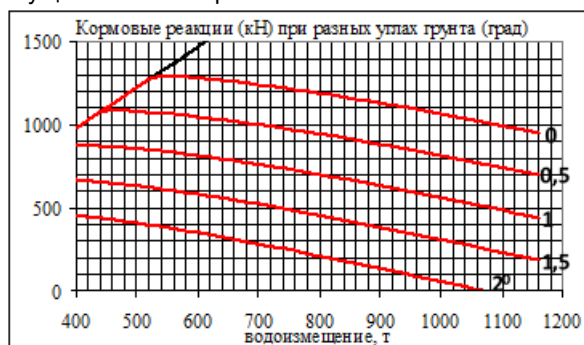


Рис. 12. Влияние водоизмещения судна и углов грунта на величину кормовой концевой реакции

В данном случае апробация Правил выполнена для самого низкого класса - NAABSA1. Ещё больше проблем может возникнуть для более высоких классов, где без ограничений в принципе не обойтись. Так для класса NAABSA2 нужно ограничивать поступательную скорость с учётом углов уклона грунта, а для класса NAABSA3 невозможно обойтись без ограничений по баллам волнения с учетом разных водоизмещений.

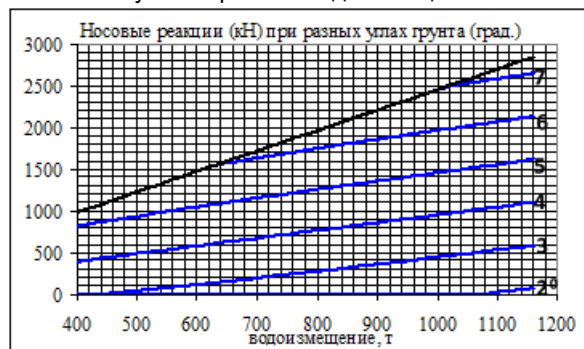


Рис. 13. Влияние водоизмещения судна и углов грунта на величину носовой концевой реакции

Таким образом, успешное приложение новой главы Правил [4] без гибкой системы учёта эксплуатационных ограничений, их обоснований и записи в разделе прочих характеристиках «Классификационных свидетельств» судов не представляется возможным. В части соблюдения ограничений лучшее это квалификация капитанов и широко известное понятие «хорошей морской практики».

Заключение

В данной работе на примере конкретного судна рассмотрены вопросы и проблемы применения положений новой главы Правил РМРС для классов NAABSA. Показаны недостатки и возможные направления развития, связанные с расчётными обоснованиями эксплуатационных ограничений для повышения надёжности и безопасности судов, взаимодействующих с грунтом.

Литература

1. Разработка нормативно-технических требований Правил РС по обеспечению безопасности специализированных судов при погрузке-выгрузке с использованием принципа осушения. Отчет о научно-исследовательской работе № 15-55475. Руководитель темы Азовцев А.И. ООО «МОРКОМТЕХ», Владивосток, 2015. Часть 1 – 194 с., Часть 2 – 203 с.
2. Азовцев А.И., Евенко В.И., Кулеш В.А., Кутейников М.А., Огай А.С., Петров В.А. Предложения по развитию требований к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. № 42/43. Санкт-Петербург. 2016. С.47-58.
3. Проект предложений по дополнению Правил классификации и постройки морских судов нормативно-методическими требованиями к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA). Сборник Нормативно-методических материалов Российского морского регистра судоходства, книга 24, Санкт-Петербург. 2016. С.5-24.
4. Требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт. Раздел 15 части XVII Правил классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства. Санкт-Петербург, 2019. С.199-207.

References

1. Razrabotka normativno-tekhnicheskikh trebovaniy Pravil RS po obespecheniyu bezopasnosti spetsializirovannykh sudov pri pogruzke-vygruzke s ispol'zovaniyem printsipa osusheniya. [Development of regulatory and technical requirements of the RS Rules to ensure the safety of specialized vessels during loading and unloading using the principle of landing on the ground], Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote № 15-55475. Rukovoditel' temy Azovtsev A.I. ООО «MORKOMTEKH», Vladivostok, 2015. Chast 1 –194 s., Chast 2 –203 s.
2. Azovtsev A.I., Yevenko V.I., Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Ogay A.S., Petrov V.A. Predlozheniya po razvitiyu trebovaniy k sudam, ekspluatatsiya kotorykh predusmatrivayet posadku na grunt. [Proposals for the development of requirements for vessels, the operation of which involves landing on the ground]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. № 42/43. Sankt-Peterburg. 2016. S.47-58.
3. Proyekt predlozheniy po dopolneniyu Pravil klassifikatsii i postroyki morskikh sudov normativno-metodicheskimi trebovaniyami k sudam, ekspluatatsiya kotorykh predusmatrivayet posadku na grunt (suda NAABSA). [Draft proposals for supplementing the Rules for the Classification and Construction of Marine Ships with regulatory and methodological requirements for ships whose operation involves landing on the ground (NAABSA ships)]. Sbornik Normativno-metodicheskikh materialov Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva, kniga 24, Sankt-Peterburg. 2016. S.5-24.
4. Trebovaniya k sudam, ekspluatatsiya kotorykh predusmatrivayet posadku na grunt. [Requirements for ships, the operation of which involves landing on the ground]. Razdel 15 chasti XVII Pravil klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Rossiyskiy Morskiy Registr Sudokhodstva. Sankt-Peterburg, 2019. S.199-207.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Анатольевич Кулеш, доктор технических наук, профессор, кафедра кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: vkulesh@mail.ru

Victor A. Kulesh, Dr. Sci. (Eng), Professor, Naval architecture department, Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, Russian Federation, e-mail: vkulesh@mail.ru

Анатолий Иванович Азовцев, доктор технических наук, профессор, кафедра теории и устройства судна, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: Azovtsev@msun.ru

Anatoly I. Azovtsev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Naval architecture department, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: Azovtsev@msun.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.081

УДК 629.12

Эффективность наружных ледовых усилений с наклоном полос

В.А.Кулеш¹, Н.Г. Пец²

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Анализ опыта эксплуатации судов показывает, что наружные усиления корпусов применяют в районах нагрузок от швартовок, воздействия якорей и тралов. В последние годы всё большее распространение получают и наружные ледовые усиления. Они особо актуальны для иностранных судов в российских условиях. Практика наружных усилений включает широкий спектр решений, но вопросы их проектирования почти не отражены в специальной литературе. В работе рассмотрены вопросы прочности и эффективности наружных ледовых усилений при разных системах набора и с учетом ориентации подкрепляющих полос под различными углами к горизонту. Предложена методика анализа прочности. Показано влияние параметров и веса усиливающих полос на прочность. Затронуты вопросы повышения долговечности наружной обшивки и снижения сопротивления движению в битых льдах. Намечены пути развития методики проектирования таких усилений.

Ключевые слова: корпус судна, наружные ледовые усиления, эффективность

Efficiency of slanted external ice hull reinforcement

Victor A. Kulesh¹, Nikolai G. Pets²

¹Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, ² Far Eastern Federal University

Abstract. Analysis experience of the ships maintenance reveals that the external reinforcements of the hulls are used in areas of loads from mooring, the impact of anchors and trawls. In recent years, such reinforcements are increasingly used to improve hull strength in ice. This is especially true for ships of foreign build in Russian conditions. The practice of hull external reinforcement includes a wide range of solutions, but their design issues are almost not reflected in the specialized literature. The paper considers the issues of strength and effectiveness of external reinforcements of hull for ice navigation for different framing systems and taking into account the orientation of the reinforcing beam at different angles to the horizon. A strength analysis technique is proposed. The effect of the parameters and the weight of the reinforcing beam on the strength is shown. The issues of increasing the durability of the outer shell and reducing the resistance to movement in broken ice are discussed. The ways of developing a design technique for such reinforcements are outlined.

Keywords: ship hull, external hull reinforcements for ice navigation, efficiency

Введение

Наружные усиления корпусов судов широко используют в практике судостроения. Наиболее распространёнными являются наружные усиления для восприятия нагрузок от швартовок в виде привальных брусьев, рис. 1.



Рис. 1. Наружные усиления корпуса судна привальными брусьями для швартовок

Широко, особенно на промысловых судах, применяют наружные приварные полосы для защиты обшивки от износа при взаимодействии с тралами и от ударов траловых досок. В таких случаях чаще наружные полосы ориентируют горизонтально или вертикально, но реже встречаются и другие решения

(рис. 2). Здесь приведены фотографии, сделанные сотрудниками кафедры Кораблестроения ДВФУ (Скопцовым М., Житниковым А., Суровым О.).

Некоторые суда имеют наружные усиления в местах вероятных ударов якорей и износа якорными цепями, особенно при наличии носовых бульбов. В последнее время всё большее применение находят наружные ледовые усиления, особенно в Японии и Южной Корее.



Рис. 2. Наружные усиления транца судна с необычной ориентацией приварных полос

На рис. 3 показан вариант наружных ледовых усилений с горизонтальной ориентацией приварных полос. В районе вероятного взаимодействия с якорями частота приварных полос увеличена.

Чаще поперечные сечения приварных полос имеют форму полукруга, но встречаются и другие формы – прямоугольные, шестигранные, полутрубы и т.д. Принцип ориентации наружных приварных полос ортогонально балкам внутреннего набора очевиден с позиции прочности. Однако их ориентация под углом к горизонту также встречается.



Рис. 3. Вариант горизонтальной ориентации наружных усилений

Обзор практики применения наружных усилений и специальной литературы показал, что кроме случая привальных брусков нормативно-методические вопросы проектирования остаются открытыми.

Способ наружных подкреплений имеет ряд очевидных преимуществ перед традиционным. Он обеспечивает возможность повысить не только прочность, но и долговечность наружной обшивки [3]. Особую актуальность он имеет для судов уже находящихся в эксплуатации. В части повышения ледовых качеств наружные усиления получают всё большее распространение применительно к судам иностранной постройки для их адаптации к российским условиям [4].

В 2008 сотрудники ДВФУ разработали первые в регионе проекты наружных ледовых усилений (НЛУ) танкера «Флагман» и рефрижератора «Залив Радуга». Их реализация позволила получить судам класс Регистра Ice1. В этих проектах применялась горизонтальная ориентация наружных полос.

Анализ опыта эксплуатации, выполненный авторами, показал, что горизонтальная ориентация наружных полос в местах с продольной системой набора не обеспечивает эффективности и в эксплуатации судов требовались замены.

В данной работе рассмотрены вопросы ледовых усилений с наклонной ориентацией наружных полос. Предложена методика анализа прочности. Затронуты вопросы эффективности НЛУ с позиции металлоёмкости. Показана возможность положительного влияния НЛУ с позиции ходкости судов в битых льдах и долговечности. Намечены пути развития методики.

1. Базовая методика

В работе [6] предельная интенсивность ледового давления для участка перекрытия с ортогональной ориентацией набора определяется путём варьирования размеров зоны разрушения (см. рис. 4) и поиска минимального значения

$$p = \min \left[8 \frac{m_a \cdot a_x / b_x + m_b \cdot b_x / a_x}{(1 - 0,5 \cdot b_p / b_x) \cdot a_x \cdot b_p \cdot [1 - a_x / (3 \cdot a_p)]} \right] \quad (1)$$

где a_x - размер зоны разрушения вдоль; b_x - размер зоны разрушения поперёк; a_p - размер зоны давлений вдоль; b_p - размер зоны давлений поперёк;

$$m_a = 0.25\sigma_1 s_a^2 + (k_2\sigma_2 W_2 + k_4\sigma_4 W_4) / a \quad (2)$$

- сопротивление шарниров, расположенных в продольных сечениях;

$$m_b = 0.25\sigma_1 s_b^2 + (k_3\sigma_3 W_3 + k_5\sigma_5 W_5) / b \quad (3)$$

- сопротивление шарниров, расположенных в поперечных сечениях;

1 – индекс обшивки; 2, 4 – индексы промежуточных и основных поперечных балок; 3, 5 – индексы промежуточных и основных продольных балок; a - расстояние между поперечными балками; b - расстояние между продольными балками; σ_i - напряжения текучести элементов – i ; s_a - толщина обшивки в продольных шарнирах; s_b - толщина обшивки в поперечных шарнирах; k_i - расчетный коэффициент заделки опор элементов с индексом – i ; W_i - статический момент площади сечения балки относительно обшивки.

Формулы (2) и (3) определяют погонные сопротивления пластических шарниров (на единицу их длины). Они соответствуют приему «размазывания» дискретных сопротивлений балок набора в соответствующих направлениях.

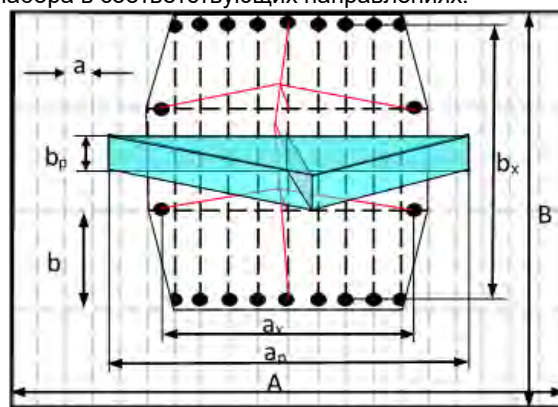


Рис. 4. Расчетная схема участка перекрытия, ледовая нагрузка и кинематическая возможная схема разрушения

Коэффициент заделки принимается в диапазоне от 0,5 до 1 в зависимости от свободной или жесткой заделки балки в опорных сечениях. При отсутствии какого-либо типа балок соответствующий параметр W_i равен нулю. Как правило, в составе участка перекрытия (кроме обшивки) должны быть балки хотя бы одного типа.

Расчеты по формуле (1) рекомендуется проводить в компьютерной программе с визуализацией и контролем графиков для получения минимальных значений давлений в области поиска. В некоторых случаях эти значения получаются при совмещении границ зоны разрушения с установленными границами участка перекрытия.

На рис. 5 дан пример расчётов перекрытия, включающего пластины с размерами 8×500×1250 мм и балки из уголка с размерами 7×75×100 мм.

Размеры пятна нагрузки 0,182×3,25 м. Размеры связей соответствуют носовому району буксира «Нагасаки», а параметры нагрузки – классу Ice2.

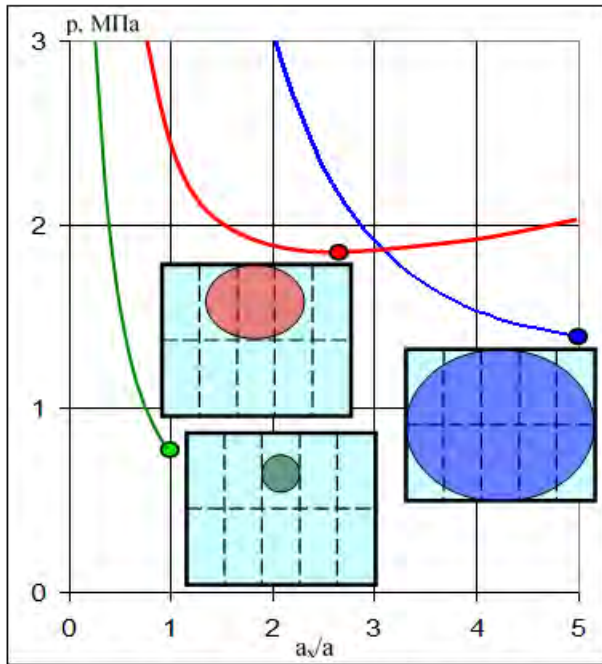


Рис. 5. Пример анализа 3-х уровней предельной ледовой прочности для участка перекрытия

Рассмотрено три возможных сценария повреждения: бухтина (1); локальная вмятина (2) и глобальная вмятина (3). Расчеты с варьированием длины зоны повреждений - a_x показывают, что наименьшая прочность (0,84 МПа) у пластин обшивки, т.е. гофрировка появится в первую очередь. Для повреждения всего перекрытия потребуется давление 1,4 МПа, а для локальных вмятин нужны давления 1,8 МПа.

2. Развитие методики

Для учёта углов наклона приварных полос к горизонту рассмотрено 2 уровня прочности – сценария повреждений, которые отражены на рис. 6. Для уровня прочности 1 при поперечной системе предельные давления

$$p = 6\sigma_0 s^{-2} \left[1 + 1 / (\bar{b}_c \cos \alpha_c - \bar{c})^2 \right], \tag{4}$$

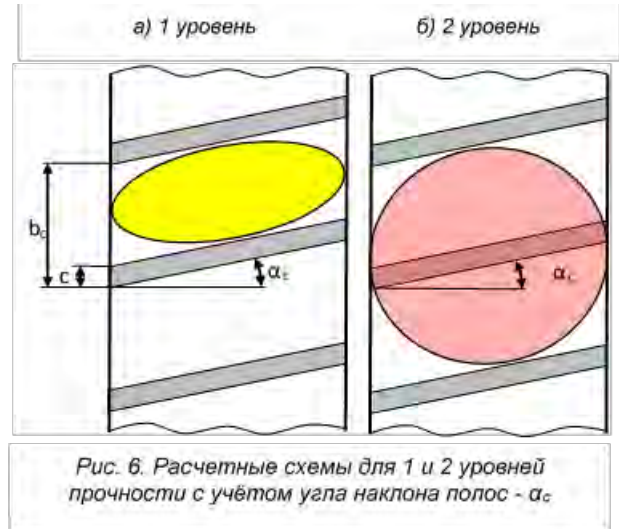
где $\bar{b}_c = \frac{b_c}{a}$; $\bar{c} = \frac{c}{a}$; $\bar{s} = \frac{s}{a}$; s – толщина обшивки.

При продольной системе

$$p = 6\sigma_0 s^{-2} \left[\bar{b} + 1 / (\bar{b}_c \cos \alpha_c - \bar{c})^2 \right]. \tag{5}$$

Формулы (4) и (5), а также рассмотренная базовая методика основаны на кинематическом методе теории предельного равновесия. Эпюра ледовой нагрузки (рис.4) имеет пиковую форму и соответствует рекомендациям [5].

Для описания второго уровня прочности учтено, что параметры полей перемещений и работа внешних сил на этих полях остаются без изменений. Поэтому при наличии углов наклона полос нужно корректировать энергию пластических шарниров, которая связана с предельным изгибающим моментом и углом слома в шарнире.



При наличии угла наклона изгибающий момент связи (полосы) разделяется на горизонтальную и вертикальную проекции, которые суммируются с сопротивлением вертикальных и горизонтальных контурных шарниров, соответственно. С ростом угла наклона полос их пролёты изменяются, что при равных прогибах ведёт к изменению углов слома шарниров и их сопротивлений. В результате, например при поперечной системе набора:

$W_{cb} = W_c \cdot \cos \alpha_c \cdot \cos \alpha_c$ - для вертикальных шарниров,

$W_{ca} = W_c \cdot \sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c$ - для горизонтальных шарниров.

На рис. 6 для случая поперечной системы набора показаны схемы возможных повреждений, соответствующие как 1 уровню прочности – пластины обшивки между полосами (а), так и 2 уровню прочности – обшивки вместе с полосой между балками набора (б). Для 2 уровня прочности следует дополнительно рассматривать варианты с повреждением двух и более полос, увеличивая высоту зоны повреждения b_x до нахождения значения минимальной прочности.

Аналогичные схемы были рассмотрены и для продольной системы. В результате для уровня прочности 2 параметры формулы (1) с учётом углов:

$$m_a = 0,25\sigma_1 s^2 + k_c \sigma_c \frac{W_{ca}}{b_c}; \tag{6}$$

$$m_b = 0,25\sigma_1 s^2 + k_c \sigma_c \frac{W_{cb}}{b_c}; \tag{7}$$

$$a_x = k_a \cdot a \quad \text{при} \quad 0 < k_a \leq 1$$

$$b_x = k_b \cdot b_p \leq b \quad \text{при} \quad k_b = 1, 2; 3; 4$$

W_{cb} - момент сопротивления контурных шарниров в вертикальном направлении; W_{ca} - момент сопротивления контурных шарниров в горизонтальном направлении.

Для продольной системы

$$W_{ca} = \sin \alpha_c \times \begin{cases} \cos \alpha_c & \text{если } -\alpha_c < \arctg(b/a) \\ \sin \alpha \cdot a/b & \text{иначе} \end{cases};$$

$$W_{cb} = \cos \alpha_c \times \begin{cases} \cos \alpha_c & \text{если } -\alpha_c < \arctg(b/a) \\ \sin \alpha \cdot a/b & \text{иначе} \end{cases}.$$

Здесь полагается, что балки внутреннего набора имеют более высокий уровень прочности и являются прочными опорами для пластин и полос.

3. Анализ прочности

На основе представленных формул выполнен анализ предельной ледовой прочности для размеров связей и параметров нагрузки, указанных в разделе 1, при варьировании углов наклона наружных полос.



Рис. 7. Пример поверхности поиска предельной прочности для уровня 2 (система поперечная, полосы R30×500, угол 25°)

На рис. 7 показана поверхность для поиска предельной прочности при повреждении обшивки вместе с сегментами (уровень 2) в случае поперечной системы набора и полос с размерами R30×500 мм под углом 25°. Предельная прочность здесь соответствует давлению 2,2 МПа при разрушении одной полосы с сечением в виде полукруглого сегмента.

Вариантные расчёты в возможном диапазоне изменения калибра полукруглых полос (R) и интервалов между ними (bc) при поперечной системе набора показали, что с увеличением угла наклона (αс):

- увеличение калибра полос может не влиять на прочность обшивки в случае больших интервалов;
- при уменьшении интервалов полос удаётся обеспечивать монотонный рост прочности обшивки;
- прочность 2 уровня (полос с обшивкой) растёт и достигает максимума при углах 15-25°, но далее монотонно падает;
- причина роста прочности 2 уровня связана с тем, что рост сопротивления в продольных шарнирах опережает потери сопротивления в поперечных шарнирах;
- кривые прочности двух уровней могут иметь точки пересечений, в которых происходит изменение кинематически возможных схем разрушения.

На рис. 8 приведено сравнение прочности 2 уровня при одинаковом варианте полос (R30×500), но при разных системах набора. Анализ результатов показывает:

- 1) при поперечной системе предпочтительнее углы наклона полос до 30°;
- 2) при небольших углах наклона продольная система значительно уступает поперечной;
- 3) для относительно эффективного усиления при продольной системе углы наклона полос должны превышать 35°;

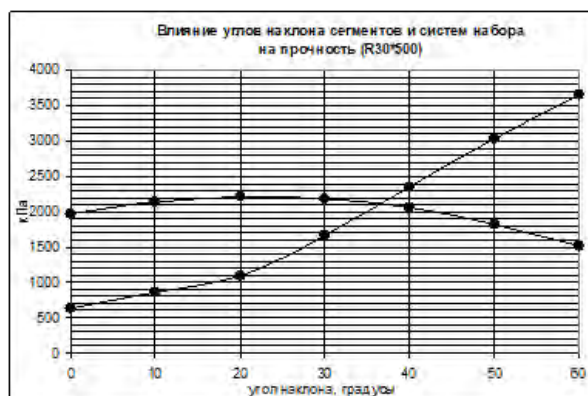


Рис. 8. Прочность 2 уровня в зависимости от угла наклона полос для разных систем набора

4) при выборе решения по параметрам усиливающих полос (калибр и интервал) следует учитывать оба уровня прочности.

4. Влияние веса усиления на прочность

Представленные результаты показывают возможности не только роста, но и снижения прочности с увеличением углов. При фиксированных интервалах между полосами вдоль обводов шпангоутов увеличение углов наклона всегда сопровождается ростом веса усиления. Поэтому для суждения об эффективности усиления можно принять критерий отношения прочности (предельных давлений) к весу усиливающих полос на единицу площади наружной обшивки. Такие результаты для 2 уровня прочности, варианта полос R30×500, двух систем набора и при разных углах наклона представлены на рис. 9.

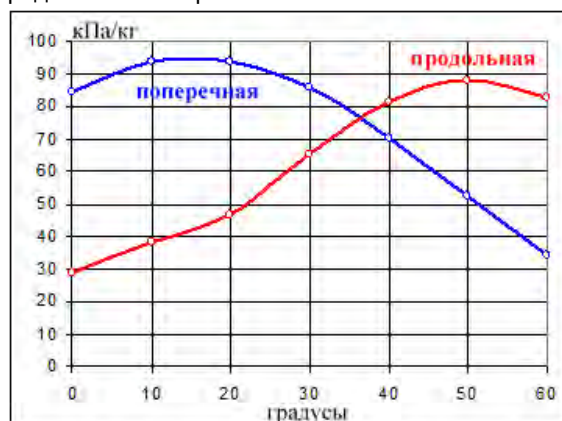


Рис. 9. Эффективность усиления от углов наклона полос для двух систем набора (R30×500)

Как видно, при поперечной системе набора наибольшая эффективность системы «обшивка - полосы» достигается при углах наклона полос 15°. Горизонтальная ориентация полос здесь имеет до 10% меньшую эффективность.

При продольной системе набора эффективность достигает максимума при углах наклона в 50°. Горизонтальная ориентация полос в случае продольной системы мало эффективна - в 3 раза меньше максимума.

Рассмотренный здесь показатель эффективности (прочности по металлоёмкости) не учитывает

трудоемкости сборочных и сварочных работ. При меньших калибрах и интервалах усиливающих полос их число увеличивается и растёт протяжённость сварных швов. Поэтому показатель эффективности по стоимости металла и труда может обеспечить смещение экстремумов.

5. Влияние на сопротивление движению

Логику проектирования наружных ледовых усилений не следует ограничивать только условиями прочности. Они могут влиять на сопротивление движению судна.

Сопротивление воды движению судна разделяют на две составляющие – трения и волновое. Наружные сегменты увеличивают площадь смоченной поверхности, что ведёт к росту составляющей трения. Однако, при отсутствии усилений обшивка может получить повреждения в виде гофрировки со стрелками прогиба даже больше, чем высоты сегментов. Например, гофрировка с прогибами до 20 мм на практике даже не регистрируется, а при шпации 0,5 м её можно оставить без замены до прогибов в 50 мм. Конструкция без усилений в этом состоянии может дать рост смоченной поверхности больше, чем при наличии наружных ледовых усилений.

Влияние наружных сегментов на волновое сопротивление оценить сложнее. Но здесь показателен пример английского судна «Monitoria», спущенного на воду в 1909г. Данный пример описан в книге Васильева Л.А. и др. (Прочные судовые гофрированные переборки. – Л.: Судостроение, 1968). Борты указанного судна были выполнены из гофрированной стали. По результатам сравнений эксплуатации этого судна с другими судами таких же размеров и мощности было выявлено снижение расхода топлива на 20% при увеличении скорости хода на 5%. Этот пример показывает, что гофрированные борты увеличив смоченную поверхность и силу трения одновременно снизили силу волнового сопротивления судна с общим положительным результатом.

При движении судов в битых льдах вопросы сопротивления сложнее и без испытаний моделей в ледовых бассейнах количественные оценки затруднительны. Анализ показывает, что наружные полосы, как выступающие части, могут способствовать повороту и притапливанию льдин. При смещении (раздвигании) судном льдин без их поворота площадь возмущения ледового покрова будет максимальной. При сценарии поворота (притапливания) судном льдин площадь возмущения ледового покрова снижается, обеспечивая и

возможность снижения сопротивления. Наружные полосы, специально расположенные под углом к горизонту, способствуют этому.

6. Влияние на износ и долговечность

Важной особенностью наружных ледовых усилений является их способность не только повысить прочность, но и перераспределить контактные ледовые давления. В результате полосы обеспечивают защиту наружной обшивки от повышенного износа во льдах.

Эти вопросы сравнительно детально рассмотрены в другой статье авторов (принятой к публикации в «Научно-техническом сборнике» Регистра). В ней на основе данных дефектаций рефрижератора «Залив Радуга» выполнен анализ эффективности наружных ледовых усилений за 10-летний период эксплуатации судна. Основные выводы.

1. Среднегодовые уменьшения толщин наружной обшивки пояса ватерлиний в носовом районе судна в российских условиях (включающих ледовые) в 4,5 раза превышают соответствующие значения для японского периода эксплуатации.

2. Наружные усиливающие полосы имеют износы, и соответственно скорости износа, в 3 раза больше, чем наружная обшивка в местах их размещения.

Таким образом, наружные ледовые усиления в виде приварных полос являются эффективным мероприятием по повышению ледовых качеств и долговечности иностранных судов, принимаемых в состав российского флота.

Заключение

Рассмотренные вопросы наружных ледовых усилений с учётом наклонной ориентации полос показали, что данный способ подкреплений повышает не только прочность, но и долговечность. Он особенно актуален для судов иностранной постройки, не имеющих ледовых усилений, но принимаемых в состав российского флота.

Предложена методика оценки прочности с учётом наружных ледовых усилений, имеющих угол наклона к горизонту. Показано, что углы наклона по критерию соотношения прочности и металлоёмкости могут обеспечивать максимальные значения. Для более полной картины важно дополнительно учитывать трудоемкость сборочных и сварочных работ.

Рассмотрено возможное влияние наружных ледовых усилений на сопротивление движению судов в условиях чистой воды и в битых льдах. Показано, что рассмотренные усиления могут способствовать снижению сопротивления.

Благодарность

Авторы выражают признательность Российскому морскому регистру судоходства, который способствовал данной работе при выполнении темы научно-исследовательской работы по его заказу № 17-58861 «Разработка проекта требований Регистра к назначению надбавок на коррозию и истирание при определении толщины наружной обшивки судов ледовых классов в зависимости от выбранных мероприятий по защите обшивки».

Литература

1. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчётах судовых конструкций. –Л.: Судостроение, 1974, 342 с.
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб, Судостроение, 2001. 511 с.
3. Кулеш В.А., Скопцов М.В. Об эффективности наружных накладных полос в ледовом поясе. Материалы региональной научно-практической конференции «Молодежь и научно-технический прогресс». ДВГТУ, Владивосток, 2006, с. 97-98.

4. Каленчук С.В., Казаков Е.В., Котлярова И.А., Сидоренко И.С. Повышение ледовых качеств реклассифицированных судов. Вологодские чтения, №71, ДВГТУ, Владивосток, 2008, с. 119-123.
5. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Обеспечение ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 39(323), СПб, 2008, с.69-89.
6. Kulesh V., Kuteynikov M., Zhitnikov I. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service // Proceedings of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. Vladivostok, 2010, p. 150-153.
7. Методика расчетного обоснования скоростей движения судов во льдах для соответствия ледовой категории Регистра с ограничениями. ООО «Научно-техническая экспертиза и консалтинг», №11, Владивосток, 2011, 16 с.
8. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls // Asian-Pacific Journal of Marine Science & Education, V.3, No.1, Vladivostok, 2013, p. 9-16.
9. Кулеш В.А., Огай С.А., Пец Н.Г. Проект ледовых усилений сухогрузного судна. Морские интеллектуальные технологии. № 3 (37). Т.2. СПб, 2017, с. 64-70.

References

1. Postnov V.A., Harhurim I.YA. Metod konechnykh elementov v raschyotah sudovykh konstrukcij [Finite element method in calculation of hull structures]. – L.: Sudostroenie, 1974, 342 s.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya hodkost' sudov [Ship propulsion in ice]. – SPb, Sudostroenie, 2001. 511 s.
3. Kulesh V.A., Skorcov M.V. Ob effektivnosti naruzhnykh nakladnykh polos v ledovom poyase [About efficiency of external reinforcements in ice belt]. Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii «Molodezh' i nauchno-tehnicheskij progress». DVG TU, Vladivostok, 2006, s. 97-98.
4. Kalenchuk S.V., Kazakov E.V., Kotlyarova I.A., Sidorenko I.S. Povyshenie ledovykh kachestv reklassifirovannykh sudov [Improving of ships characteristic in ice]. Vologdinskije chteniya, №71, DVG TU, Vladivostok, 2008, s. 119-123.
5. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.YA. Obespechenie ledovoj prochnosti i bezopasnoj ekspluatatsii sudov v rossijskikh arkticheskikh i zamerzayushchih moryah na osnove kompleksnoj sistemy formirovaniya principial'nyh inzhenernykh reshenij [Providing hull strength in ice and safe navigation of ships in the Russian Arctic and freezing seas based on an integrated system for the formation of fundamental engineering solutions]. Trudy CNII im. akad. A.N. Krylova. Vyp. 39(323), SPb, 2008, s.69-89.
6. Kulesh V., Kuteynikov M., Zhitnikov I. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service. Proceedings of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. Vladivostok, 2010, p. 150-153.
7. Metodika raschetnogo obosnovaniya skorostej dvizheniya sudov vo l'dah dlya sootvetstviya ledovoj kategorii Registra s ogranicheniyami [Calculation methodology for the speed of movement of vessels in ice for compliance with the ice category of the Register with restrictions]. ООО «Научно-техническая экспертиза и консалтинг», №11, Владивосток, 2011, 16 с.
8. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls. Asian-Pacific Journal of Marine Science & Education, V.3, No.1, Vladivostok, 2013, p. 9-16.
9. Kulesh V.A., Ogaj S.A., Pec N.G. Proekt ledovykh usilenij suhogruznogo sudna [The project of dry cargo vessel hull reinforcement for ice navigation]. Morskie intelektual'nye tekhnologii. № 3 (37). T.2. SPb, 2017, s. 64-70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Анатольевич Кулеш, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и устойчивости судна, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: vkulesh@mail.ru

Victor A. Kulesh, Dr. Sci. (Eng), Professor, Naval architecture department, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, 50-a, Verkhneportovaya st., Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: vkulesh@mail.ru

Николай Геннадьевич Пец, аспирант кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: pecng85@gmail.com

Nikolai G. Pets, postgraduate of Shipbuilding Department at Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, Russian Federation, e-mail: pecng85@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.054

УДК 623.828.9

Эволюция корабельного состава флота: от судов комплексного снабжения и управления - к плавучей базе морских робототехнических комплексов

Г.Ю. Илларионов¹, А.С. Шмаков¹, К.З. Лаптев², С.С. Дмитриев¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Институт проблем морских технологий

Аннотация. В составе флотов развитых стран на сегодняшний день уже имеются многоцелевые корабли и суда, которые сочетают в себе качества следующих кораблей: корабля комплексного снабжения; корабля управления; базы обеспечения десантных операций в море; быстроходного судна доставки грузов и техники внутри театра военных действий; корабля поддержки сил специальных операций; научно - исследовательского судна, оснащенного подводными аппаратами. Актуальность развития отечественной военной и специальной робототехники обусловлена географическими, демографическими и внешнеполитическими факторами. Сложившаяся политическая и экономическая обстановка в мире требует быстрого и продуктивного приложения их усилий в области создания высокотехнологичных робототехнических комплексов. В связи с активизацией в России работ по созданию робототехнических комплексов различного назначения становится актуальным вопрос о том, как будет организован процесс их применения в отдаленных морских районах. В этой связи авторы статьи предлагают задуматься над созданием корабля нового класса – плавучей базы морских робототехнических комплексов, которая будет обеспечивать решение широкого круга задач, присущих разным классам кораблей и судов.

Ключевые слова: боевые корабли, суда, плавучая база, робототехнический комплекс, флот

The evolution of the fleet: from the complex supply and control ships to marine robotic systems base

Gennady Y. Illarionov¹, Andrew S. Shmakov¹, Constantin Z. Laptev², Sergei S. Dmitriev¹¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²Institute of marine technology problems

Abstract. In the navies of the developed countries, in varying degrees, are multi-purpose ships and vessels, which combine the quality of the following vehicles: the comprehensive supply ship; control ship; base of support amphibious operations in the sea; a fast ship to deliver cargo and equipment within theater of operations; the ship for support special operations forces; research vessel equipped with underwater vehicles. The relevance of the development of domestic military and special robotics is due to geographical, demographic and foreign policy factors. The current political and economic situation in the world requires rapid and productive application of their efforts in the field of high-tech robotic systems. In connection with the intensification of work in Russia on the creation of robotic systems for various purposes, the question how the process of their application in remote marine areas will be organized becomes urgent. In this regard, the authors propose to think about the creation of a new class ship-a floating base for marine robotic systems, which will provide a wide range of tasks inherent for different classes of ships and vessels.

Key words: warships, vessels, floating base, robotic complex, fleet

Введение

С целью снижения зависимости боевых кораблей, выполняющих задачи в океане, от береговых пунктов базирования, которые требуются для проведения экстренных ремонтных работ, дозаправки и в других непредвиденных ситуациях, все большее развитие получает концепция «морского базирования». В обеспечение этой концепции зарубежные ВМС разрабатывают, наряду со специализированными вспомогательными судами, также и многофункциональные суда, исключаящие необходимость использования береговой инфраструктуры других государств, а также корабли вспомогательного флота с боевым

вооружением.

Значительное внимание к многоцелевым кораблям обеспечения объясняется тем, что на современном этапе все большее значение придается операциям проецирования силы, которые невозможны без хорошо организованной логистической составляющей.

Десантно-транспортный корабль типа T-MLP «Montford Point»

На верфи фирмы NASSCO (США) построены три многоцелевых десантных платформы типа «Montford Point» (рис. 1).



Рис. 1. Испытания десантно-транспортного корабля типа T-MLP «Montford Point» Командования морских перевозок США: а – на ходу; б – прием корабля на воздушной подушке; в – корабль в полупогруженном положении

Суда этого типа будут использоваться в качестве плавучей базы для обеспечения десантных операций в море. Судно оборудовано автомобильной палубой площадью 2320 м², аппарелью с пандусом для передачи грузов с использованием погрузчиков на другие корабли при швартовке бортом, а также тремя линиями передачи грузов на суда на воздушной подушке.

Судно может перевозить 1740 т топлива, 380 т воды и десять шестиметровых (20 фт.) грузовых контейнеров. В ходе испытаний, в частности, проверялось практическое базирование на судне *Montford Point* десантных катеров на воздушной подушке типа LCAC и десантирование с корабля плавающих бронетранспортеров [1, 12]

Быстроходные транспорты JHSV (Joint High Speed Vessel) типа «Spearhead»

Примером реализации концепции «Морское базирование» служит проект быстроходных транспортов JHSV (*Joint High Speed Vessel*) типа «Spearhead» (рис. 2). В настоящее время ведется строительство серии таких 10 судов для ВМС США. Они предназначены для доставки грузов и техники внутри театра военных действий (ТВД). Длина судна составляет 103 м, ширина 28,5 м, осадка 3,8 м, водоизмещение 2360 т.

Открытая палуба обладает полезной площадью 1800 м². Судно JHSV может действовать на мелководье и в портах, включая погрузку и разгрузку автомобильной техники своим ходом (*roll-on/roll-off*). Прочность кормовой аппарели позволяет использование основного боевого танка M1A2 Abrams. Судно способно перевозить 635 т полезной нагрузки на расстоянии более чем 1200 миль при крейсерской скорости 35 уз [1,12].



Рис. 2. Быстроходное транспортное судно JHSV (*Joint High Speed Vessel*) типа «Spearhead»

Выгрузка тяжелой самоходной техники возможна через кормовую аппарель, более легкой – при

помощи палубного крана с телескопической стрелой грузоподъемностью 18,2 т. Предусмотрены 312 мест для размещения десанта, а также 146 койко-мест для раненых. JHSV приводится в движение 4 водометными движителями *Wartsila WLD 1400 SR* от 4 дизельных двигателей с редукторами. Двигатели мощностью 9,1 МВт каждый обеспечивают максимальную скорость 43 уз. JHSV оснащено полетной палубой для вертолета *CH-53E Stallion Super*. Летная палуба (вертолетная площадка) размещена по оси судна и оснащена станцией управления вертолетом.

Члены экипажа размещены в 2 отдельных каютах. Сидячие места предусмотрены для десанта из 312 чел., а также постоянные койки для 104 чел. и временные – для 46 чел. [3].

Судно комплексного снабжения и управления BRAVE, разработанное компаниями DCNS и STX France для ВМС Франции

Ряд европейских стран также создает, многоцелевые вспомогательные суда. Фирмами DCNS и STX France для ВМС Франции разработан проект судна BRAVE (рис. 3), которое может играть роль танкера, госпитального судна или корабля управления. BRAVE предназначен так же для транспортировки вооружения, контейнеров, топлива, других грузов, и может осуществлять заправку боевых кораблей в море.



Рис. 3. Проект судна комплексного снабжения и управления BRAVE, разработанный компаниями DCNS и STX France для ВМС Франции

Для увеличения грузоподъемности и вместительности в среднюю часть корпуса могут быть врезаны одна или две дополнительные секции. Длина судна составляет от 180 до 205 м, водоизмещение около 30000 т, максимальная дальность плавания 18 уз ходом 10000 миль, максимальная скорость хода 20 уз.

Помимо экипажа численностью 100 чел. на судне могут разместиться также 100 пассажиров. Судно

также предназначенного для транспортировки от 6000 до 12000 т топлива, 1500 т пресной воды, а также 2000 т продовольствия, медикаментов, запчастей и 300 т боеприпасов (в 4 оружейных погребах общей площадью 700 м²).

Грузообработку на судне обеспечивают 4 устройства для передачи груза на ходу, расположенные в средней части судна (2 устройства предназначены для передачи топлива, а еще два являются многофункциональными).

Для передачи грузов по воздуху имеется вертолетная площадка, а также ангар для 2 вертолетов массой до 15 т. Проектом предусматривается возможность врезки в центральную часть судна одного или двух дополнительных модулей с двумя вертолетными площадками для тяжелых вертолетов и двумя дополнительными кранами для одновременной погрузки на судно 4 различных типов грузов.

В кормовой части судна могут быть размещены дополнительные модули в зависимости от конкретно выполняемых задач. Предусмотренный проектом трюм площадью 2700 м² обеспечивает размещение 30 (20 фт) контейнеров.

Проект корабля комплексного снабжения *BRAVE* впервые был представлен на военно-морском салоне *Euronaval 2010*.

Многоцелевой корабль «Absalon» (L16) ВМС Дании

В странах НАТО разработаны суда (корабли) вспомогательного назначения, способные выполнять помимо функций обеспечения также и функции боевого корабля. К таковым относятся корабли типов «Absalon» ВМС Дании (рис. 4).



Рис. 4. Многоцелевой корабль «Absalon» (L16) ВМС Дании

Корабль имеет водоизмещение 6600 т; длину 137,6 м; ширину 19,5 м; осадку 6,3 м; скорость хода 24 уз; дальность плавания 9000 миль (на скорости 15 уз); автономность 28 сут; экипаж 100 чел. Энергетическая установка состоит из 2 дизельных двигателей мощностью 16,6 МВт, с 2 гребными винтами регулируемого шага. Корабль оснащен 5 модулями вооружения контейнерного типа *StanFlex* (3 контейнера с вертикальными пусковыми установками для зенитных ракет и 2 – для противокорабельных). На корабле установлена система управления огнем *CEROS-200*, обеспечивающая подсветку целей для РЛС систем самонаведения ракет, 4 РЛС типа «Flexfire» и оптико-электронные системы обнаружения целей. Имеется

ангар на 2 вертолета. Полетная палуба площадью 850 м² рассчитана для вертолетов массой до 20 т и может быть использована для размещения стандартных контейнеров.

На грузовой палубе размещаются два десантных катера *SRC-90E*, способных транспортировать 1,8 т. оборудования и 9 пассажиров.

Корпус корабля изготовлен из композитных материалов. На кораблях типа «Absalon» имеются 2 системы передачи грузов в море, расположенные побортно. Кормовая аппарель обеспечивает прямой доступ к палубе площадью 915 м², на которой могут быть размещены самоходная техника (танки «Leopard-2») и модульный госпиталь на 40 койко-мест [5].

Корабль комплексного снабжения A530 «Maud»

На судостроительном предприятии южнокорейской корпорации *Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME)* для ВМС Норвегии построен корабль комплексного снабжения *A530 «Maud»* (рис. 5). Корабль имеет полное водоизмещение 27500 т; длину 183 м; ширину 25,9 м; осадку 8,6 м; скорость хода 18 уз; дальность плавания 10000 миль (на скорости 16 уз). Энергетическая установка дизель-электрическая и включает 2 дизеля по 7,5 МВт и 2 электромотора [6].

Помимо выполнения задач обеспечения корабельных группировок в море, судно обладает возможностями по транспортировке грузов (в том числе контейнерных) и личного состава при решении экспедиционных задач, а также играет роль корабля управления. При экипаже 43 чел. на судне возможно размещение дополнительно еще 73 чел. и госпиталя на 50 коек.



Рис. 5. Корабль комплексного снабжения

Корабль способен перевозить 7125 т дизельного топлива, 317 т авиационного топлива, 650 т сухих грузов и 40 20-футовых контейнеров. В ангаре базируются два вертолета. Штатное вооружение составляют четыре 12,7-мм дистанционно управляемые пулеметные установки «Kongsberg Sea Protector» [6].

Корабль комплексного снабжения JSS (Joint Logistic Support Ship) типа «Karel Doorman»

Корабль комплексного снабжения *JSS (Joint Logistic Support Ship)* типа «Karel Doorman» (рис. 6) построен для ВМС Нидерландов.



Рис. 6. Корабль комплексного снабжения JSS (Joint Logistic Support Ship) типа «Karel Doorman»

Он предназначен для материально-технического обеспечения сил флота в море, поддержки наземных операций, а также приема и высадки десанта на необорудованный берег. На корабле оборудована вертолетная палуба размерами 80×30 м для 2 вертолетов типа «Chinook», в ангаре может быть размещено ещё 6 вертолетов [13]. Судно оборудовано палубным краном, двумя системами передачи грузов на ходу и имеет кормовую аппарель для высадки 2 десантных катеров и быстроходных наддувных плавсредств. Корабль может транспортировать до 10600 т грузов. На корабле выполнен ряд мероприятий по снижению физических полей, защите от неуправляемых поражающих средств (баллистическая защита), повышению взрывостойкости и установлена улучшенная система пожаротушения. Головное судно «Karel Doorman» заложено в 2011 г. на верфи фирмы DSNS в г. Galatz, Румыния, в 2013 г. переправлено в Голландию на верфь в Vissingen [13].

Судно комплексного снабжения и управления «Березина» пр. 1833Р

Советский союз также не отставал от передовых идей в кораблестроении. Судно комплексного снабжения «Березина» пр. 1833 (рис. 7) было построено на судостроительном заводе имени 61 коммунара в г. Николаеве в 1975 г.



Рис. 7. Судно комплексного снабжения и управления «Березина» пр. 1833

Корабль предназначался для комплексного снабжения 2–3 корабельных группировок зенитными ракетами, артиллерийским, торпедным, противолодочным и авиационным боезапасом, материально-техническими средствами, продовольствием, топливом и водой. Судно водоизмещение 24565 т; длину 209,6 м; ширину 25,1 м; осадку 8,2 м.; скорость хода 21,3 уз.; дальность плавания 10100 миль; экипаж 290 чел.; грузоподъемность 2500 т; топлива., 1600 т; воды; 900 т сухого груза. Силовая установка корабля 2-вальная (2 газовые турбины мощностью 2×11,2 МВт). Вооружение: 2 артустановки АК-725; 4 артустановки

АК-630; 2 ЗРК «Оса-М»; 2 установки РБУ-1000. Судно было оснащено площадкой размером 12×12 м со светотехническим оборудованием и ангаром для 2 вертолетов Ка-27. В состав радиотехнического вооружения судна входили: ГАС обнаружения ПЛ; станция обнаружения ПЛ по тепловому следу; РЛС контроля воздушной и надводной обстановки МР-302 «Рубка»; 2 навигационные РЛС типа «Волга», а также аппаратура сбора и обработки информации «Планшет-1833».

Средства связи обеспечивали связь судна с НК, ПЛ и береговыми узлами связи на 12 каналах одновременно. Перевозимые запасы размещались в 27 хранилищах и 43 складах общим объемом 17000 м³, оснащенных средствами механизации с компьютеризированной системой учета материально-технических средств «Волна» на базе ЭВМ «Минск-32», а также устройствами типа «Струна» для комплексного снабжения на ходу до 3 боевых кораблей одновременно.

Судно обеспечивало размещение и перевозку 182 чел. для смены экипажей НК и ПЛ в море, а также их санитарную обработку и медицинское обслуживание. Тактические качества корабля снабжения «Березина» проверялись при фактическом обеспечении кораблей 5-й оперативной эскадры в Средиземном море и на специальных тыловых учениях в Черном, Средиземном и Баренцевом морях [7].

Необходимость создания плавучих баз

ВМС США пришли к пониманию целесообразности и необходимости создания многофункциональной плавучей базы, которая в первую очередь обеспечивает выполнение задач морского спецназа. Переоборудование под эти цели судов грузового флота в состоянии сэкономить значительные денежные средства.

В то время как современные военно-морские суда стоят миллиарды долларов, а на их постройку может уйти десятилетие, ВМС США прибегают к аренде грузовых судов, осуществляя их последующее переоборудование под специальные задачи. Именно так военно-транспортное командование США поступило с грузовым кораблем «Cragside» (рис. 8), превратив его в судно морской поддержки сил специальных операций.



Рис. 8. Судно ВМС США «Cragside», переоборудованное в плавбазу морского спецназа

Использование таких кораблей обеспечивает эффективное проецирование силы в Мировом океане, обеспечивая проведение точечных операций, которые предполагают внезапность и быстроту выполнения с привлечением робототехнических комплексов различного

назначения и сил спецназа [8].

В настоящее время в мире известно несколько судов – носителей морских робототехнических комплексов (РТК), например научно-

исследовательское судно «Discovery» Национального института океанографии (Великобритания), которое является носителем большого количества подводных аппаратов (рис. 9).



Рис. 9. Научно-исследовательское судно «Discovery» – носитель подводных аппаратов

Это судно имеет водоизмещение 2800 т; длину 90 м и автономность 45 сут. Оно снабжено широким диапазоном океанографического оборудования для 28 научных сотрудников и дополнительно может взять на борт до 10 контейнерных лабораторий [10].

Таким образом, на сегодняшний день уже имеются многоцелевые корабли и суда, которые сочетают в себе качества следующих кораблей:

- корабля комплексного снабжения (контейнеровоза);
- корабля управления;
- плавучей базы обеспечения десантных операций в море;
- быстроходного судна доставки грузов и техники внутри ТВД;
- корабля поддержки сил специальных операций;
- научно-исследовательского судна, оснащенного подводными аппаратами.

Создание робототехнических комплексов в России

В связи с активизацией в России работ по созданию робототехнических комплексов (РТК) различного назначения, с уже реализованными перспективными разработками и с учетом осмысления накопленного опыта эксплуатации созданных аппаратов, становится актуальным вопрос о том, как будет организован процесс их применения в отдаленных морских районах [10].

Робототехнические комплексы (рис. 10) – это новый вид морских подводных и надводных технических средств, предназначенный для решения широкого круга военных, специальных и двойного назначения задач, как самостоятельно, так и совместно с различными носителями.



Рис. 10. Возможный состав подводных аппаратов на плавучей базе РТК

В состав РТК входят: автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА); телеуправляемые (по кабелю) необитаемые подводные аппараты (ТНПА); безэкипажные катера (БЭК); беспилотные

летательные аппараты (БПЛА), а также средства обеспечения их навигации, связи, управления и реконфигурирования.

По нашему убеждению, система хранения,

технического обслуживания, подготовки к применению и применения РТК должна быть организована на вновь созданных структурах, таких как береговые и плавучие базы РТК флота. Причем если на береговой базе РТК (ближайший прототип торпедо-техническая база флота, флотилии), данные вопросы возможно решать «безболезненно», то поддержание группировки РТК в состоянии полной готовности к применению, в случае хранения их на борту плавучей базы РТК, является достаточно сложным вопросом во всех отношениях.

Очевидно, что система подготовки к применению, применения и все виды технического обслуживания РТК, которые размещаются на плавбазе, должна иметь такие же возможности, как на береговых базах РТК. Отсюда вытекают определение, назначение и специальные требования к плавбазе как носителю РТК различного назначения.

Плавучая база РТК – это специализированное судно, на котором находятся РТК и элементы их вспомогательных подсистем (в необходимом количестве). На базе РТК осуществляется хранение, обслуживание, ремонт, подготовка к применению, применение и (или) выдача РТК на носители. Плавучие базы РТК, как правило, дислоцируются в пунктах базирования сил флота.

Плавучие базы РТК выполняют задачи по предназначению самостоятельно или в составе соединений сил флота в оперативно важных районах Мирового океана, обеспечивая решение ряда специальных задач (свойственных только РТК) и повышая эффективность корабельного состава соединения.

Повышение эффективности решения задач соединения обеспечивается за счет применения находящихся на плавбазе робототехнических комплексов, применяемых в трех средах: подводной, надводной и воздушной.

В состав РТК, базирующихся на плавбазе, входят: АНПА и ТНПА различных типов и назначения; БПЛА морского базирования различных типов и назначения; БЭК различных типов и назначения; донные причальные устройства (ДПУ), гидроакустические системы навигации (ГАСС) и другие элементы обеспечивающей подводной инфраструктуры. Плавбаза РТК в составе соединения участвует в решении поставленных

задач, а так же и самостоятельно выполняет силами, находящимися на борту подводных РТК, такие задачи как:

- освещение донной обстановки;
- гидролокационное обследование донной поверхности в заданном районе;
- акустическое профилирование дна по маршруту или в заданном районе;
- фото обследование донной поверхности сплошным покрытием района;
- детальное фото и видеообследование выделенных донных целей;
- поиск, обследование и картографирование объектов, находящихся на грунте;
- сбор данных для формирования картин полей физико-химических параметров среды в заданном районе;
- выполнение широкого круга гидрографических исследований;
- отображение данных в геоинформационной системе;
- участие в противодиверсионных и противоминных действиях;
- ретрансляция сигналов управления и передача информации на подводные лодки;
- выполнение подводно-технических работ;
- обследование подводной части корпусов кораблей и гидротехнических сооружений;
- выполнение операций по подъему оборудования;
- дообследование целей, обнаруженных АНПА, составление формуляра цели.

Основные идеи архитектурного облика плавучей базы РТК состоят в следующем:

- внутреннее наполнение полезных объемов плавучей базы состоит из модулей на базе морских транспортных контейнеров, где размещаются и хранятся РТК различных типов и назначения со своим ЗИП и вспомогательным оборудованием (рис. 11);
- в состав плавучей базы входят средства для спуска на воду и подъема на борт образцов АНПА, БЭК, ДПУ и др. (рис. 12);
- в состав плавучей базы входит пост управления и связи (ПУС) со всеми РТК, находящимися в море и в воздухе.

Прототипом плавучей базы РТК может быть судно «Игорь Белоусов».

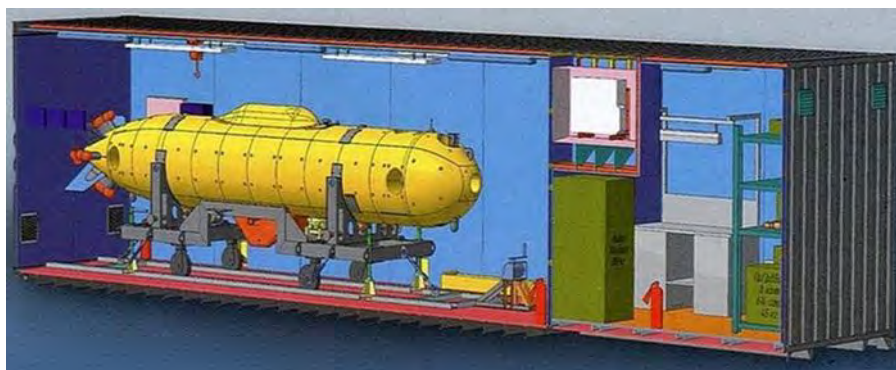


Рис. 11. Пример конструкции модуля для размещения

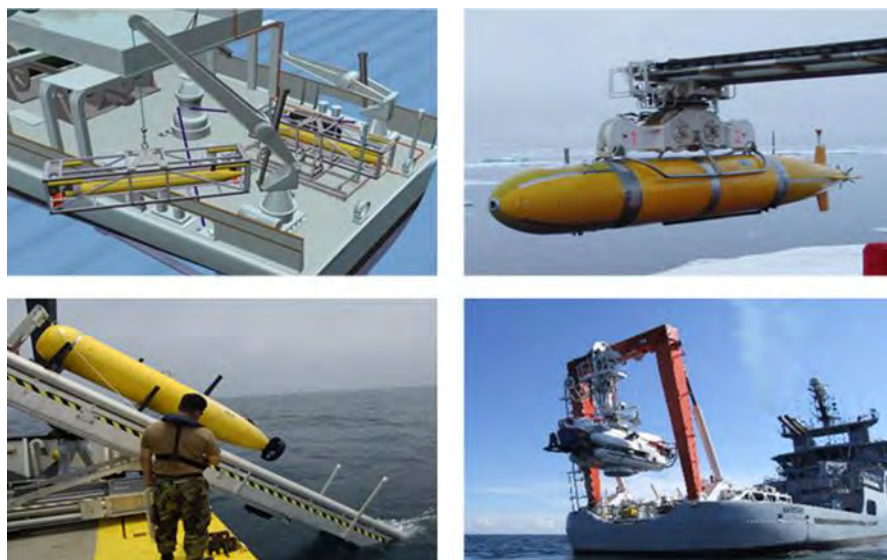


Рис. 12. Примеры конструкции образцов спускоподъемных средств для РТК на плавбазе

Состав АНПА, ТНПА, БЭК, БПЛА, и др. на плавучей базе РТК может быть следующим (см.рис. 10): АНПА типа «Клавесин»; РТК типа «Галтель»; АНПА «Пилигрим», «Платформа» или ММТ 2012; ТНПА – уничтожитель потенциально опасных объектов «Чилим»; рабочие большие ТНПА; рабочие средние ТНПА; малогабаритный АНПА типа «Марк»; БЭК для АНПА «Марк»; БЭК для ТНПА «Чилим»; ДПУ для АНПА; БПЛА различных типов.

Всего на плавучей базе РТК одновременно может находиться, ед.: АНПА – 26; ТНПА – 22; ТНПА-уничтожителей – 20 (пусковых устройств с постом управления – 5); ДПУ – 2; БЭК – 4; БПЛА – 10; маяков-ответчиков ГАНС – 40; донных приборов ГАСС – 20; вспомогательное и обеспечивающее оборудование к каждому типу АНПА и ТНПА; запасное имущество и приспособления к каждому типу АНПА, ТНПА, БЭК, БПЛА и ДПУ.

Общее количество и тип РТК определяется решением командующего, планирующего применение плавбазы РТК в зависимости от поставленных задач. Бортовые средства навигации и связи для АНПА и ТНПА обеспечивают совместно с ГАНС: определение координат АНПА на его борту и на посту управления в реальном времени; телеуправление АНПА; обмен телеметрической информацией между АНПА и постом управления. ГАНС изготавливается в двух вариантах: для стационарного и мобильного вариантов применения.

Литература

1. Испытания десантно-транспортного корабля «Montford Point» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bmpd.livejournal.com/916406.html>. Загл. с экрана.
2. Мозговой А. «Ключевые элементы» сил вторжения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/navy/2014/1126/143814578/detail.shtm>.
3. Американское единое высокоскоростное судно JHSV [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://topwar.ru/23874-amerikanskoe-edinoe-vysokoskorostnoe-sudno-jhsv.html>.
4. Французский корабль комплексного снабжения BRAVE. <https://topwar.ru/20537-francuzskiy-korabl-kompleksnogo-snabzheniya-brave.html>.
5. Корабль управления и поддержки HDMS «Absalon» (L16) ВМС Дании <http://www.korabli.eu/galleries/oboi/voennye-korabli/absalon>.
6. Норвежский корабль комплексного снабжения Maud наконец-то в море <https://bmpd.livejournal.com/3046376.html>.
7. Судно снабжения «Березина» проекта 1833 шифр «Пегас» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://korabley.net/news/sudno_snabzheniya_berezina_proekta_1833_shifr_pegas/2011-03-08-792.

Заключение

Идея создания плавучей базы РТК исходит из понимания ее необходимости и неизбежности создания в связи с резким повышением роли и места робототехнических комплексов во всех сферах деятельности ВМФ РФ.

Необходимость такого решения вызвана динамично развивающейся международной обстановкой, решением Военно-Морским Флотом оперативных задач в удаленных районах Мирового океана, таких как Сирия, Арктика и др.

Преимуществами применения РТК с борта плавбазы являются:

- возможность оперативно формировать номенклатуру РТК, базирующихся на плавбазе, для решения различных задач;
- широкий спектр задач, которые способны решать РТК с борта плавбазы;
- оперативность и качество предоставления командованию информации, получение которой возможно только с помощью РТК;
- высокая скрытность и эффективность применения средств подводной робототехники и подводных технических средств сил специального назначения;
- способность плавбазы РТК решать оперативные задачи как в составе соединения сил флота, так и самостоятельно.

8. Юферев С. Секретная плавучая база американского спецназа не отличается от грузового судна. 6 августа 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://topwar.ru/55650-sekretnaya-plavuchaya-baza-amerikanskogo-spcnaza-ne-otlichaetsya-ot-gruzovogo-sudna.html>. Загл. с экрана.
9. RRS «Discovery» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vv-travel.ru/tarticle/rrs-discovery-1962>.
10. Сиденко К.С., Илларионов Г. Ю. Роль и место необитаемых подводных аппаратов в современной морской стратегии // Арсенал (военно-промышленное обозрение). 2008. № 1. С. 102 – 109.
11. Новицкий И. Российский подводный «Клавесин» сыграет на нервах НАТО [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vsepodrobnosti.ru/blog/43776859689/Rossiyskiy-podvodnyiy-«Klavesin»-syigrayet-na-nervah-NATO>.
12. Испытания десантно-транспортного корабля нового типа T-MLP 1 Montford Point Командования морских перевозок США. 18.06.2014 (с) ВМС США / www.sldinfo.com.
13. Ввод в строй корабля Karel Doorman [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bmpd.livejournal.com/1280982.html>.

References

1. Ispytaniya desantno-transportnogo korablya "Montford Point" [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://bmpd.livejournal.com/916406.html>. Zagl. s ekrana.
2. Mozgovoy A. "Klyuchevye elementy" sil vtorzheniya [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/navy/2014/1126/143814578/detail.shtm>.
3. Amerikanskoe edinoe vysokoskorostnoye sudno JHSV [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://topwar.ru/23874-amerikanskoe-edinoe-vysokoskorostnoye-sudno-jhsv.html>.
4. Frantsuzskiy korabl' kompleksnogo snabzheniya BRAVE. <https://topwar.ru/20537-francuzskiy-korabl-kompleksnogo-snabzheniya-brave.html>.
5. Korabl' upravleniya i podderzhki HDMS "Absalon" (L16) VMS Danii <http://www.korabli.eu/galleries/oboi/voennye-korabli/absalon>.
6. Norvezhskiy korabl' kompleksnogo snabzheniya Maud nakonets-to v more. <https://bmpd.livejournal.com/3046376.html>.
7. Sudno snabzheniya "Berezina" proekta 1833 shifr "Pegas" [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: http://korabli.net/news/sudno_snabzheniya_berezina_proekta_1833_shifr_pegas/2011-03-08-792.
8. YUferev S. Sekretnaya plavuchaya baza amerikanskogo spetsnaza ne otlichaetsya ot grubovogo sudna. 6 avgusta 2014 [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://topwar.ru/55650-sekretnaya-plavuchaya-baza-amerikanskogo-spcnaza-ne-otlichaetsya-ot-gruzovogo-sudna.html>. Zagl. s ekrana.
9. RRS "Discovery" [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://vv-travel.ru/tarticle/rrs-discovery-1962>.
10. Sidenko K.S., Illarionov G. YU. Rol' i mesto neobitaemykh podvodnykh apparatov v sovremennoy morskoy strategii // Arsenal (voenno-promyshlennoe obozrenie). 2008. № 1. S. 102 - 109.
11. Novitskiy I. Rossiyskiy podvodnyy "Klavesin" sygraet na nervakh NATO [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://vsepodrobnosti.ru/blog/43776859689/Rossiyskiy-podvodnyiy-«Klavesin»-syigrayet-na-nervah-NATO>.
12. Ispytaniya desantno-transportnogo korablya novogo tipa T-MLP 1 Montford Point Komandovaniya morskikh perevozok SSHA. 18.06.2014 (s) VMS SSHA / www.sldinfo.com.
13. Vvod v stroy korablya Karel Doorman [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://bmpd.livejournal.com/1280982.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Юрьевич Илларионов, доктор технических наук, профессор кафедры Тактики, боевой подготовки и морской практики Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6

Андрей Станиславович Шмаков, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника училища по учебной и научной работе, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: andrey.shmakov.1970@mail.ru

Константин Зотеевич Лаптев, заместитель директора по инновационным вопросам, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Сергей Сергеевич Дмитриев, начальник отделения кадров, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: navy-sergey@mail.ru

Gennady Y. Illarionov, Professor, Dr. Sci. (Eng)., Professor of the Department of tactics, combat training and naval practice Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, 690062, Vladivostok, Kamskij lane, 6, Russian Federation

Andrew S. Shmakov, Associate Professor, Ph.D. (Eng)., Deputy director of academic and research, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: andrey.shmakov.1970@mail.ru

Constantin Z. Laptev, Deputy Director of innovation Institute of marine technology problems of Far East branch of Russian Sciences Academy, 690091, Vladivostok, Sukhanov str., 5A, Russian Federation

Sergei S. Dmitriev, Director of Human resources departmen, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, 690062, , Vladivostok, Kamskij lane, 6, Russian Federation, e-mail: navy-sergey@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.028

УДК 621.431.74.016

Оценка спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля

Б.И. Руднев¹, О.В. Повалихина¹

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Использование математических моделей, в основу которых положен зональный метод расчета теплообмена излучением, применительно к камере сгорания судового дизеля, требует предварительного определения ряда энергетических характеристик. Важнейшей из них является спектральная оптическая толщина пламени. Целью данной статьи является разработка расчетного метода для оценки спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36. Показано, что величина спектральной оптической толщины пламени зависит от трех основных параметров: коэффициента ослабления излучения, концентрации частиц сажи и их оптических характеристик (среднего диаметра и параметра дифракции). Представлены распределение частиц сажи по размерам и значения спектральной оптической толщины пламени в функции угла поворота коленчатого вала для судового дизеля 6 ЧН 24/36 при испытании его по нагрузочной характеристике. Приведены основные подходы, позволяющие определить интегральную степень черноты пламени в камере сгорания с использованием полученных расчетных данных по его спектральной оптической толщине.

Ключевые слова: судовый дизель, спектральная оптическая толщина пламени, радиационный теплообмен.

Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina¹

¹Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. Application of mathematical models in the base of them a zonal method of calculation of radiative transfer is included in additional to marine diesel combustion chamber, it is required first determination the number of power data. Spectral optical thickness of flame is very important. Development of method calculation for the estimation of spectral optical thickness of flame in marine diesel 6 ChN 24/36 combustion chamber is the purpose of this paper. A value of spectral optical thickness of flame depends from three basic data: coefficient of attenuation radiation, concentration of soot particles and its optical data (mean diameter and parameter of diffraction) is given. Distribution of soot particles according to sizes and values of spectral optical thickness of flame in function of crank angle degree for marine diesel 6 ChN 24/36 in its power data is shown. Basic methods per missing to determine integral degree of flame blackness in combustion chamber with application of calculation data on its spectral optical thickness is determined.

Key words: marine diesel, spectral optical thickness of flame, radiation heat transfer.

Введение

В структуру математических моделей (ММ), позволяющих определить локальные потоки излучения на поверхностях деталей камеры сгорания (КС) судовых дизелей в качестве исходных входит ряд энергетических характеристик. Важнейшей из них является спектральная оптическая толщина пламени [1,2]. Целью данной статьи является разработка расчетного метода для оценки спектральной оптической толщины пламени в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36. Как известно [1,2] величина спектральной оптической толщины пламени в основном определяется тремя параметрами: коэффициентом ослабления излучения, концентрацией частиц сажи и их оптическими характеристиками (средним диаметром и параметром дифракции). В ранее выполненных работах [3] оптические данные по частицам сажи (средний диаметр и параметр дифракции) принимались по опубликованным в научно-технической литературе сведениям и имели весьма приближенный характер. Это вносило существенную

(до 15 – 20%) неточность в расчетную величину локальных результирующих потоков излучения в КС дизелей. В рамках настоящей статьи впервые в отечественной практике исследований радиационного теплообмена в КС дизельных двигателей рассмотрен метод оценки спектральной оптической толщины пламени с учетом реальных (полученных экспериментальным путем) оптических характеристик частиц сажи применительно к судовому дизелю типа 6 ЧН 24/36 [4,5].

1. Экспериментально-расчетный метод определения спектральной оптической толщины пламени в КС судового дизеля

Основным излучателем в светящемся пламени судового дизеля являются частицы сажи. Локальная концентрация и оптические характеристики последних в совокупности с коэффициентом поглощения определяют степень черноты пламени [6]. Анализ теоретических решений для области малых значений параметра дифракции, приведенных в [1,2], показывает, что частицы сажи обладают низкой поглощательной способностью во

всей области спектра теплового излучения пламени. Величина и спектральный ход коэффициентов ослабления в значительной степени определяются параметром дифракции ρ и дисперсией оптических параметров $n(\lambda)$ и $\chi(\lambda)$ (показателя преломления n и показателя поглощения χ), n и χ связаны соотношением (1)

$$m = n - i\chi, \quad (1)$$

где $i = -1$.

Таким образом для расчета излучения частиц сажи (сажистого пламени) наряду с размерами частиц d (средним диаметром) необходимо знать и их количественные показатели преломления $m(\lambda)$ во всех областях спектра теплового излучения пламени. Вопрос об оптических параметрах аморфного углерода (сажи) подробно рассмотрен в [1,2].

Определение спектрального показателя ослабления K_λ связано с выяснением вопроса, можно ли частицы сажи, образующиеся в КС судового дизеля типа 6 ЧН 24/36, считать малыми или нет, так как выражение для K_λ в области малых и больших частиц не совпадают. В работе [1] показано, что частицы сажи могут быть отнесены к малым, если выполняется условие $\rho \leq 0,1$ при $|m|\rho < 1$ для ближней инфракрасной области спектра от $\lambda = 0,5$ мкм до $\lambda = 6,0$ мкм. Расчеты по параметрам $|m|\rho$ для частиц дизельной сажи были выполнены в [6]. Их результаты показали, что зависимость $|m|\rho$ близка к гиперболе и условие $|m|\rho < 1$ выполняется для всей ближней инфракрасной области спектра, а следовательно, частицы сажи в пламени дизеля с полным основанием могут быть отнесены к малым частицам. В силу этого для определения спектрального коэффициента ослабления можно воспользоваться формулой, представленной в [1]

$$K_\lambda = \Phi(m)\rho, \quad (2)$$

где $\Phi(m)$ – функция комплексного показателя преломления; $\rho = \pi d/\lambda$ – параметр дифракции; d – средний диаметр частиц сажи; λ – длина волны излучения.

Как установлено в [1] зависимость $\Phi(m) = f(\lambda)$ является линейной убывающей и в диапазоне длин волн от 0,5 мкм до 6,0 мкм с достаточной точностью описывается уравнением

$$\Phi(m) = 1,36(1 - 0,1\lambda), \quad (3)$$

Подставляя в (2) значение $\Phi(m)$ из (3), получим выражение для спектрального коэффициента ослабления

$$K_\lambda = 1,36(1 - 0,1\lambda)\rho. \quad (4)$$

Справедливость зависимости (4) для турбулентного сажистого пламени каковым является пламя в КС судового дизеля показана в [7]. Зависимость (4) является приближенной, сопоставление результатов расчета K_λ по (4) и по точным теоретическим формулам выполнено в [1]. При этом показано, что вплоть до $\rho \leq 0,1$ значения K_λ , рассчитанные на ЭВМ по точным формулам и по зависимости (4), практически совпадают. При $\rho > 0,1$ появляются заметные расхождения. Однако даже для $\rho = 0,15$ отличие составляет (в среднем по всей области спектра излучения пламени) не более 10%. В расчетах средний диаметр частиц сажи принимался на основе экспериментальных данных

[4,5] и составлял $d_{cp} = 0,035 - 0,045$ мкм. Отмеченное выше позволяет успешно применять формулу (4) для расчетов излучения частиц сажи в светящихся пламенах при значении параметра дифракции $\rho \leq 0,1$ [1].

Полученные авторами настоящей статьи распределения частиц сажи по размерам при испытании судового дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике для режимов 100% и 75% от номинальной мощности $Ne_{ном}$ показано на рис. 1 и 2. На гистограммы, представленные на этих рисунках специально нанесены кривые нормального распределения, чтобы показать весьма существенное отличие от него экспериментальных данных.

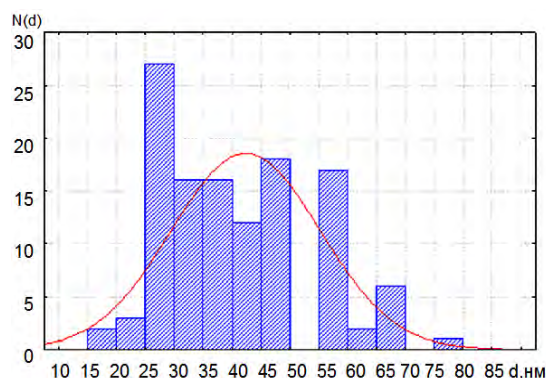


Рис. 1. Распределение частиц сажи по размерам, судового дизеля 6ЧН 24/36, нагрузка 100% от $Ne_{ном}$.

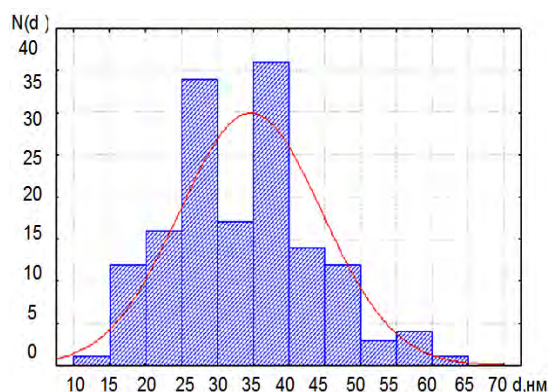


Рис. 2. Распределение частиц сажи по размерам, судового дизеля 6ЧН 24/36, нагрузка 75% от $Ne_{ном}$.

К аналогичным выводам относительно вида распределения частиц сажи по размерам пришли и другие исследователи, изучавшие их оптические характеристики опытным путем [8,9].

Спектральная оптическая толщина пламени τ_λ связана, как известно [1,2], со спектральным показателем ослабления K_λ уравнением

$$\tau_\lambda = 1,5K_\lambda\mu L/(\gamma d). \quad (5)$$

где μ – концентрация частиц сажи; L – эффективная длина пути луча; γ – удельный вес частиц сажи.

Величина γ для частиц дизельной сажи лежит в узких пределах 1800 – 2100 кг/м³ и может быть принятой равной 1950 кг/м³. Подставив в выражение (4) в (5) и выполнив преобразование, имеем

$$\tau_\lambda = \frac{6,4}{\gamma} (\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L. \quad (6)$$

Обозначив постоянную величину $6,4/\gamma$ через C , окончательно получим

$$\tau_\lambda = C(\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L. \quad (7)$$

Результаты расчетов спектральной оптической толщины пламени применительно к КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 для режимов 75% и 100% от $N_{e\text{ном}}$ показаны на рис. 3 и 4. Необходимо отметить весьма сильную зависимость этой величины как от длины волн, так и от угла поворота коленчатого вала (ПКВ). Последнее объясняется характером изменения концентрации частиц сажи в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 в функции угла ПКВ.

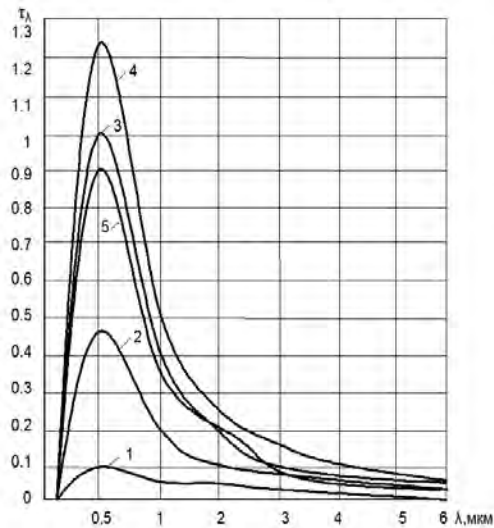


Рис.3. Изменение оптической толщины пламени судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 75% от $N_{e\text{ном}}$: 1 – ВМТ; 2 – 20° после ВМТ ПКВ; 3 – 40° ; 4 – 60° ; 5 – 80°

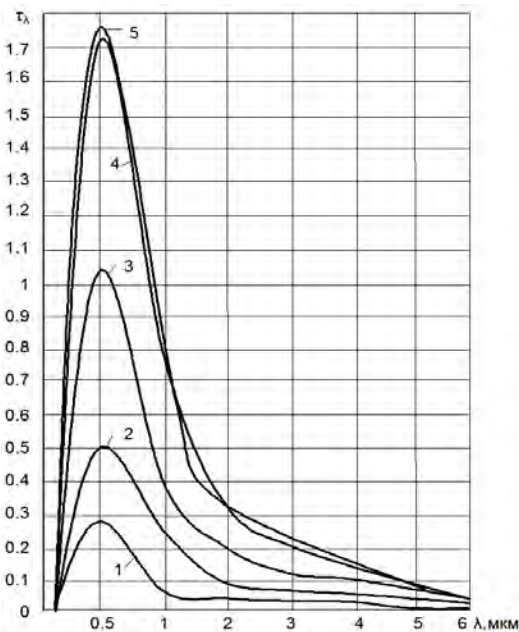


Рис.4. Изменение оптической толщины пламени судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 100% от $N_{e\text{ном}}$: 1 – ВМТ; 2 – 20° после ВМТ ПКВ; 3 – 40° ; 4 – 60° ; 5 – 80°

2. Спектральная и интегральная степени черноты пламени в КС судового дизеля

Спектральная оптическая толщина пламени связана с его спектральной степенью черноты законом Бугера.

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-\tau_\lambda). \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражение (7) получим

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L] \quad (9)$$

Переход от спектральной степени черноты пламени к ее интегральной величине может быть осуществлен по зависимости

$$\epsilon = \frac{\int_{0,5}^6 \{1 - \exp[-C(\lambda^{-1} - 0,1) \cdot \mu L]\} E_0 d\lambda}{\int_{0,5}^6 E_0 d\lambda}, \quad (10)$$

где E_0 – интенсивность излучения абсолютно черного тела при температуре дизельного пламени, определяемая по закону Планка.

Величины интегральной степени черноты пламени для пяти режимов нагрузочной характеристики судового дизеля 6 ЧН 24/36, рассчитанные по зависимости (10), представлены на рис. 5. Из него видно, что с ростом нагрузки дизеля интегральная степень черноты пламени возрастает.

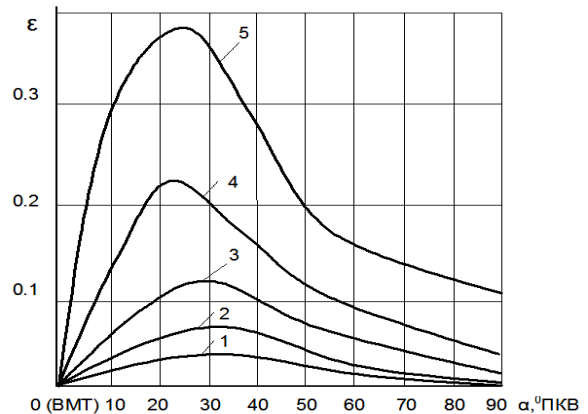


Рис.5. Изменение интегральной степени черноты пламени при испытании судового дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике: 1 – холостой ход; 2 – 25% от $N_{e\text{ном}}$; 3 – 50%; 4 – 75%; 5 – 100%

Заключение

Предложенные в статье оценки спектральной оптической толщины пламени и его интегральной степени черноты были использованы в зональной ММ для расчета локальных результирующих потоков излучения на поверхностях, образующих КС. Сопоставление расчетных и известных экспериментальных данных по локальным результирующим потокам излучения показало их различие в среднем на 10 – 15%, что вполне приемлемо для практики проектирования и доводки современных судовых дизелей.

Литература

1. Блох А.Г., Журавлев А.Г., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991, 432 с.
2. Modest M.F. Radiative heat transfer. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
3. Петриченко Р.М., Батурин С.А., Исаков Ю.Н. и др. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ под ред. Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, 1990, 328 с.
4. Израильский Ю.Г., Повалихина О.В., Руднев Б.И. Исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3(33), Т.1, С. 159 – 164.
5. Руднев Б.И., Курявый В.Г., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи дизельного двигателя // Тепловые процессы в технике, 2016, Т.8, №9, С. 416 – 422.
6. Руднев Б.И. Определение излучательной способности дизельного пламени // Динамика судовых энергетических установок и их систем. М.: В/О Мортехинформреклама, 1991, С. 57 – 62.
7. Кузнецов В.Р., Сабельников В.Р. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1988, 288 с.
8. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полецук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989, 128 с.
9. Carpenter K., Johnson J.H. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p.

References

1. Blokh A.G., Zhuravlev A.G., Ryzhkov L.N. Teploobmen izlucheniye: Spravochnik [Radiative heat transfer]. M.: Energoatomizdat, 1991, 432 s.
2. Modest M.F. Radiative heat transfer [Radiative heat transfer]. New York: Academic Press, 2003, 822 p.
3. Petrichenko R.M., Baturin S.A., Isakov Yu. N. i dr. Elementy sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya DVS: Algoritmy prikladnykh programm [Elements of system automatic of designing internal combustion engines: Algorithms apply of program] pod red. R.M. Petri-chenko. L.: Mashinostroyeniye, 1990, 328 s.
4. Izraillskiy Yu.G., Povalikhina O.V., Rudnev B.I. Issledovaniye opticheskikh parametrov i nanostruktur chastits sazhi sudovogo dizelya [Investigation of optical parameters and nanostructures of diesel soot particles] // Morskiye intellektualnyye tekhnologii, 2016, №3(33), T.1, S. 159 – 164.
5. Rudnev B.I., Kuryavyu V.G., Povalikhina O.V. Eksperimentalnoye issledovaniye opticheskikh parametrov i nanostruktur chastits sazhi dizelnogo dvigatelya [Experimental investigation of optical parameters and nanostructures of diesel soot particles] // Teplovyye protsessy v tekhnike, 2016, T.8, №9, S. 416 – 422.
6. Rudnev B.I. Opredeleniye izluchatelnoy sposobnosti dizelnogo plameni [Definition radiative of capacity diesel of flame] // Dinamika sudovykh energeticheskikh ustanovok i ikh sistem. M.: V/O Mortechnikinformreklama, 1991, S. 57 – 62.
7. Kuznetsov V.R., Sabelnikov V.R. Turbulentnost i goreniye [Turbulence and combustion]. M.: Nauka. 1988, 288 s.
8. Bakirov F.G., Zakharov V.M., Poleschchuk I.Z. i dr. Obrazovaniye i vygoraniye sazhi pri szhiganiy uglevodorodnykh topliv [Formation and combustion of soot about combustion hydrocarbon of fuels]. M.: Mashinostroyeniye, 1989, 128 s.
9. Carpenter K., Johnson J.H. Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques [Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques] // SAE Preprints, 1979, № 790815, 17 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борис Иванович Руднев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Boris I. Rudnev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, 52B, Lugovaya str, e-mail: povalichina@mail.ru

Ольга Владимировна Повалихина, доцент, доцент кафедры холодильной техники, кондиционирования и теплотехники, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет 690087, Владивосток ул. Луговая, 52б, e-mail: povalichina@mail.ru

Olga V. Povalikhina, associate professor, associate professor of Department of refrigeration equipment, condition and heat transfer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, 52B, Lugovaya str, e-mail: povalichina@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.056

УДК 621.515

Экспериментальное исследование отрывных течений потока в криволинейных каналах постоянного сечения

С.В. Чехранов¹, Р.Р. Симашов¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Целью работы является выявление особенностей течения газа в криволинейных каналах. Приводится анализ влияния различных воздействий на отрывные явления в сильноизогнутых криволинейных каналах. Это связано с тем, что в малорасходных турбинах с большим поворотом потока в ступени применяются активные ступени с сильноизогнутыми межлопаточными каналами рабочего колеса. Отрывные явления, происходящие в таких каналах, существенно снижают к.п.д. турбин. В статье приводятся результаты экспериментального исследования дозвуковых течений газового потока в криволинейных каналах при воздействии на отрыв пограничного слоя пассивных генераторов вихрей в виде песочной шероховатости и треугольных канавок. Исследования проводились на воздухе с моделями криволинейных каналов постоянного поперечного сечения при различной геометрической величине пассивных генераторов вихрей. Высота бугорков песочной шероховатости менялась от 50 мкм до 100 мкм, а количество турбулизаторов в виде треугольных канавок варьировалось от трех до шести. Показано, что наиболее положительный эффект достигается при использовании пассивных генераторов вихрей в виде треугольных канавок. Песочная шероховатость дает меньший эффект, а в некоторых случаях даже ухудшает характеристики потока

Ключевые слова: малорасходные турбины, отрыв потока, пограничный слой, пассивные генераторы вихрей

Experimental research of the separate flows in curved line channels of constant section

Sergei V. Chekhranov¹, Rafail R. Simashov¹¹Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. Goal of the work is identification of features gas flows in curved channels. The analysis of the influence of various effects on separation phenomena in strongly curved channels is given. This is due to the fact that active stages with strongly curved blade channels of the rotor wheel are used in low-consumption turbines with a large flow turn in the stages. Separation phenomena occurring in such channels significantly reduce the efficiency of turbines. The paper presents the results of an experimental research of subsonic gas flow in curved channels when passive vortex generators in the form of sand roughness and triangular grooves act on the separation of the boundary layer. The studies were conducted in air with models of curved channels of constant cross-section for various geometric sizes of passive vortex generators. The height of the sand roughness tubercles varied from 50 μm to 100 μm , and the number of turbulators in the form of triangular grooves varied from three to six. It is shown that the most positive effect is achieved using passive vortex generators in the form of triangular grooves. Sand roughness gives less effect, and in some cases even worsens flow characteristics

Key words: low-consumption turbines, flow separation, boundary layer, passive vortex generator

Введение

Развитие энергетики неразрывно связано с созданием и совершенствованием современных технических средств, к которым, несомненно, относятся и малорасходные турбины (МРТ). В настоящее время существует очень широкий спектр конструкций таких турбин. И это неудивительно, поскольку МРТ используются в самых различных областях человеческой деятельности, где требуются компактные и достаточно мощные приводы различных устройств. Причем, МРТ все чаще используются не только как вспомогательные приводы, но и как главные двигатели.

Более широкое применение МРТ предъясвляет и более жесткие требования к энергетической эффективности таких турбин. Такой подход вполне оправдан, поскольку у МРТ имеется достаточно большой резерв для повышения к.п.д. Прежде всего, относительно большая величина внутренних потерь энергии связана с тем, что абсолютная величина зазоров в проточной части МРТ во многих случаях соизмерима с высотой сопловых и рабочих лопаток турбин. Кроме того, в МРТ большие относительные величины шероховатости и толщины входных и выходных кромок лопаток заметно повышают

величину лопаточных потерь по сравнению с большими турбинами. Все это существенно усложняет экспериментальное исследование газодинамических процессов, протекающих в МРТ. В настоящее время существует немало программных компьютерных средств, позволяющих проводить численные эксперименты по изучению структуры потока в каналах любой сложности, причем, даже в трехмерной постановке. Но такие численные исследования можно будет считать достоверными, если мы будем располагать хотя бы тестовыми результатами физического эксперимента, по которым можно оценивать достоверность задания начальных условий для программы численного эксперимента. Поэтому физический эксперимент был и остается основным источником знаний о процессах, протекающих в МРТ.

Особенности течения потока в активных ступенях МРТ

Необходимо отметить, что значительная часть малорасходных турбин выполняется парциальными именно из-за малых расходов рабочего тела. А в парциальных турбинах приходится применять только активные ступени в связи с наличием неактивной

дуги у рабочего колеса и повышенными относительными зазорами в проточной части, куда поток может растекаться в случае реактивной ступени.

Как уже отмечалось, далеко не все рекомендации, применимые для профилей полноразмерных турбин, могут с достаточной надежностью использоваться в МРТ. И как отмечено различными исследователями, наиболее надежным источником информации о потерях в ступенях с короткими лопатками является эксперимент.

Это особенно актуально тогда, когда речь идет о таких конструкциях турбин, где течение потока обусловлено целым рядом особенностей, существенно влияющих на методологию построения математических моделей такого течения. В частности, иногда исследователи, исходя из соображений экономии средств, пытаются полностью заменить физический эксперимент численным. Если при этом апробация результатов численного эксперимента производится по результатам сторонних экспериментальных исследований турбин с параметрами близкими к тем, что заложены в математическую модель, то такая апробация считается адекватной.

В настоящее время немалый интерес для практического применения представляют МРТ с большим углом поворота потока в рабочем колесе, более известные как турбины конструкции ЛПИ [1], [2], один из вариантов которых представлен на рис. 1.

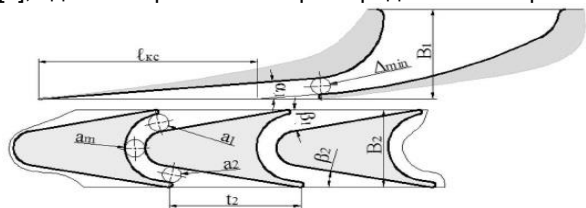


Рис. 1. Схема осевой МРТ конструкции ЛПИ

В сильноизогнутых межлопаточных каналах таких МРТ структура потока существенно отличается от картины течения в межлопаточных каналах турбин традиционных конструкций.

Как видно из данных И.И. Кириллова [3] представленных на рисунке, к.п.д. решетки профилей в зависимости от относительной высоты резко меняется при изменении высоты и при фиксированной хорде, в то время как такая же зависимость протекает более полого при фиксированной высоте и переменной хорде.

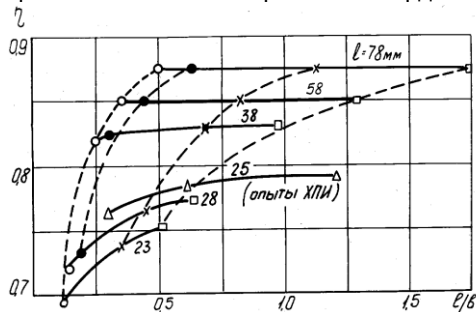


Рис. 2. Влияние относительной высоты лопаток на потери в плоской решетке профилей (по И.И. Кириллову)

Это связано в первую очередь с отрывными явлениями, неизбежно возникающими в таких каналах, и, во-вторых, с преобладанием влияния относительной ширины лопаток l/b над относительной высотой l/D_{cp} . [3], Это влияние представлено на рис.2.

Здесь уместно вспомнить, что многими исследователями отмечалось, что величина относительной высоты лопаток существенно влияет на уровень концевых потерь. В частности, отмечалось, что потери кинетической энергии в решетке профилей резко возрастают при достижении некоторого уровня величины относительной высоты лопаток. Это явление связывают со смыканием парного вихря у концов лопаток. Все эти процессы активно исследовались в Московском энергетическом институте (МЭИ) и других организациях [4], [5], [6], [7], [8], [9], где поток в межлопаточных каналах траверсировался при различных величинах относительной высоты лопаток.

Результаты исследований показали, что величина концевых потерь резко возрастает при отношении высоты лопатки к ширине горла решетки $l/a \approx 1$. А вот при $l/a \gg 1$ эти же потери практически не меняются. Иначе говоря, в коротких лопатках концевые потери имеют наибольшую величину по сравнению с другими видами лопаточных потерь энергии. Есть еще один любопытный результат исследования таких течений в коротких лопатках активных турбин при наличии отрыва потока в межлопаточных каналах рабочего колеса (РК). Концевые вихри способны существенно уменьшить зону отрыва, превращая ее в ограниченный "отрывной пузырь". Но, здесь многое зависит от параметров самого потока. В этой связи следует отметить, что в коротких лопатках очень важно учитывать влияние на величину концевых потерь таких параметров, как конфузурность и кривизну каналов, число Маха и направление потока на входе. И в целом, для протяженных межлопаточных каналов более точные результаты анализа движения потока получаются при введении в расчет геометрических параметров канала, а не решетки профилей. А это очень важно при исследовании структуры течения потока.

Особенно наглядно это видно при анализе такого явления как "веерность" лопаток РК осевых турбин. Выражается она в разной величине шага лопаток вдоль радиуса колеса. При этом, если лопатки изготавливаются отдельно, или фрезеруются на диске РК, то поперечное сечение межлопаточного канала РК выглядит в форме трапеции. У корня лопаток ширина межлопаточного канала меньше, чем у периферии. И это вполне логично в рамках теории обтекания решетки профилей газовым потоком. Но для вышеописанных МРТ конструкции ЛПИ гораздо важнее формировать межлопаточный канал, обеспечивающий минимальные потери кинетической энергии при течении в нем газового потока. Такие турбины, в которых проточная часть формируется не за счет профилирования лопаток, а за счет построения высокоэффективных межлопаточных каналов РК часто называют "канальными". Хотя, когда первичными становятся уже не лопатки, а каналы, то каналы трудно будет называть межлопаточными. Дело в том, что при

формировании канала его ширина вдоль радиуса РК может и не меняться, а меняться будет толщина лопатки.

Все сказанное особенно важно для МРТ конструкции ЛПИ при выборе надежной методики их расчета. Практически все турбины этой конструкции имеют ступени активного типа, причем, межлопаточные каналы обеспечивают угол поворота потока в рабочем колесе 145...167 градусов. А если учесть, что в активных ступенях поток проходит через РК с очень высокой скоростью, то с большой долей вероятности можно говорить о наличии отрыва потока внутри межлопаточного канала.

Исследование течения потока в криволинейных каналах постоянного сечения

Отрывные явления в межлопаточных каналах турбомашин неизбежно приводят к большим потерям кинетической энергии потока и, как следствие, к пониженному к.п.д. турбины в целом. Здесь следует отметить фундаментальные работы П. Чжена [10] [11], где были проанализированы причины, порождающие отрыв, различные критерии отрыва, и даны рекомендации по управлению отрывом потока. Пользуясь данными рекомендациями, сделаем поправку на то, что в нашем случае мы рассматриваем не обтекание потоком турбинных профилей, а течение в сильно изогнутых криволинейных каналах. В этой связи невозможно не отметить результаты исследований одиночных криволинейных каналов исследователя Н. Nippetrt [12], в экспериментах которого угол поворота потока в каналах менялся от 90 до 180° при варьировании различных геометрических факторов. В настоящее время заметный вклад в исследование течения потока в криволинейных каналах вносят М. Zagzoule, Р. Cathalifaud, J. Cousteix, J. Mauss [13], D. Wilde [14].

В данной статье мы приводим результаты собственных экспериментальных исследований криволинейных каналов с параметрами, соответствующими геометрическим характеристикам рабочего колеса реальной малорасходной турбины. Целью исследования является выяснение наличия, или отсутствия отрыва потока в канале постоянного сечения и выработка рекомендаций по организации течения потока в каналах такой формы.

Для исследования были выбраны модельные криволинейные каналы прямоугольного сечения с углом поворота 167°. Высота каналов 28 мм, ширина на всем протяжении 8 мм. Поворотный участок образован концентрическими окружностями. Перед поворотом и за ним имеются прямолинейные участки длиной по 80 мм. В качестве основного условия выбрана неизменность площади поперечного сечения канала по всей его длине, т.е. конфузорность канала: $a = F_{вых}/F_{вх} = 1$. Прямолинейность входного участка канала обусловлена необходимостью формирования равномерного поля скоростей перед поворотным участком. Как отмечено многими исследователями, прямолинейный участок за поворотом снижает потери кинетической энергии потока почти в два раза по сравнению с каналом без такого участка. И это во многом объясняет, почему результаты исследований различных авторов не совпадают. Что касается режимных параметров, то они моделируют реальные

режимы течения в рабочем колесе МРТ, где активные ступени имеют дозвуковые рабочие колеса. Потери энергии в каналах измерялись с помощью траверсирования потока в выходном сечении канала.

Для оценки возможности отрыва потока в канале было выполнено дренирование стенок канала по его средней высоте как с выпуклой, так и с вогнутой сторон. Места дренирования показаны на рис. 3. Состояние потока контролировалось по параметру относительного давления: $P = P_{изб}/P_{атм}$. В соответствии с рекомендациями различных авторов в эксперименте были применены пассивные генераторы вихрей для управления отрывом потока. В частности, применялась песочная шероховатость на выпуклой поверхности поворотного участка и генераторы вихрей в форме канавок треугольной формы с постепенно уменьшающейся глубиной и протяженностью по рекомендации Лоудера (Lowder) [15]. В данном конкретном случае глубина канавок составила 0,5 мм. При этом число Маха на входе в канал поддерживалось в пределах $M = 0,6...0,7$ для каналов с песочными генераторами вихрей, и $M = 0,7...0,9$ для каналов с канавочными генераторами.

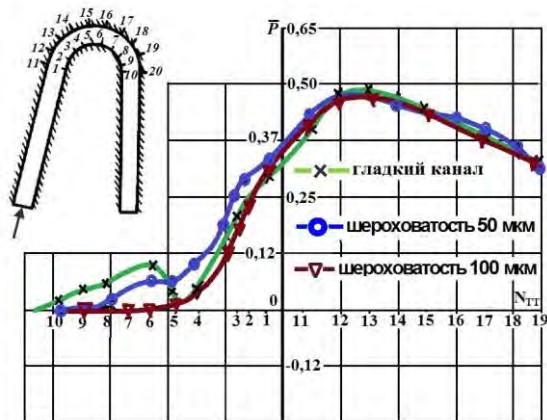


Рис. 3 Распределение относительного давления по стенкам криволинейного канала с песочной шероховатостью

На рис. 3 представлены результаты измерения относительного статического давления на стенках канала с гладкими стенками и с песочной шероховатостью при высоте бугорков 50 мкм и 100 мкм. Эпюры статического давления показывают, что в средней части поворотного участка гладкого канала начиная с точки 5, появляется ярко выраженная зона диффузорного течения, которая, как правило, сопровождается отрывом пограничного слоя. Причем, дальше по потоку градиент давления снижается, и отрыв локализуется, образуя "отрывной пузырь". Применение песочной шероховатости с высотой бугорков 50 мкм позволило существенно снизить градиент давления в поворотном участке, что может свидетельствовать о небольшой зоне отрыва. А шероховатость с бугорками 100 мкм вообще убрала отрыв из поворотного участка. Однако, следует отметить, что по измерениям энергии потока определено, что если в гладком канале с отрывом пограничного слоя потери энергии составили 26%, то с песочной шероховатостью потери составили 29%. Это говорит о том, что при наличии локального отрыва песочная шероховатость малоэффективна. Тем не менее, согласно данным

различных исследователей турбулизация погранслоя песочной шероховатостью может быть полезной при развитом отрыве, выходящем в выходное сечение канала.

Результаты исследований с другими генераторами вихрей представлены на рис. 4.

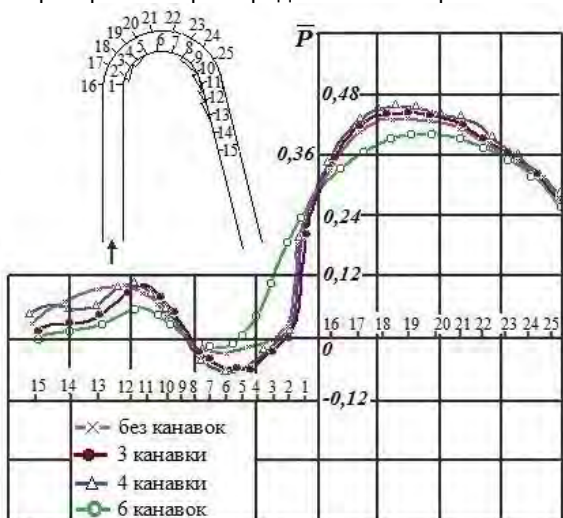


Рис. 4 Распределение относительного давления по стенкам криволинейного канала с треугольными канавками

Здесь отчетливо видны участки конфузورного течения, т.е. с ускорением потока от входа до т. 5 и начиная с т.5 диффузорного течения, сопровождающегося отрывом погранслоя. На вогнутой стенке, практически, по всему криволинейному участку - зона диффузорного течения. Потери кинетической энергии в гладком канале составили 27 % при $Re = 2,1 \cdot 10^5$ и 39 % при $Re = 1,1 \cdot 10^5$.

Для этого канала были применены турбулизаторы в виде генераторов вихрей Лоудера. Сначала три канавки были нарезаны, начиная с 10-й точки, которая находится перед точкой с максимальным градиентом давления. Зона диффузорного течения сократилась, но точка максимального градиента

сдвинулась вверх по потоку. При этом, заметного изменения потерь энергии не наблюдалось. Тогда выше по потоку, начиная с точки 8 была нарезана четвертая канавка. В этом случае, при $M = 0,9$ отмечено небольшое снижение потерь энергии ($\approx 1\%$), что возможно связано с небольшим увеличением области конфузорного течения. И, наконец, были нарезаны дополнительно 2 канавки в начальной части поворотного участка от точки 2 до точки 5. При шести канавках область диффузорного течения, вызывающая отрыв, уменьшилась как по величине градиента давлений, так и по ее протяженности. По результатам траверсирования потока можно отметить, что заметного изменения потерь энергии не произошло. Однако, существенно уменьшилась неравномерность поля скоростей в выходном сечении канала, что говорит о положительном влиянии пассивных генераторов вихрей на формирование структуры потока в канале.

Заключение

Представленный анализ результатов экспериментального исследования течения газовых потоков в криволинейных каналах свидетельствует о наличии в каналах отрывных явлений. К настоящему времени известно множество методов воздействия на пограничный слой и на его отрыв, но, как правило, во многих конкретных случаях приходится проводить дополнительные исследования с целью получения более полных сведений о течении газа в канале и о его структуре.

Воздействие на отрыв путем турбулизации пограничного слоя - давно известный метод, но с появлением новых конструкций турбин, проточная часть которых в большей степени образуется каналами, а не профилями, возникают и новые требования к методикам расчета таких каналов. В представленном анализе экспериментального исследования воздействия пассивных генераторов вихрей на отрыв пограничного слоя видно, что турбулизаторы в виде треугольных канавок более эффективны, чем песочная шероховатость и могут быть рекомендованы к применению в каналах, склонных к отрывным явлениям.

Литература

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161.
2. Забелин, Н.А. Раков Г.Л., Себелев А.А. и др. Влияние уплотнений на эффективность малорасходных турбинных ступеней конструкции ЛПИ. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №3 (178). С. 32-41.
3. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 536 с.
4. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
5. Дейч М.Е., Баранов В.А., Фролов В.В. и др. Влияние высоты лопаток на некоторые характеристики одновенечных ступеней турбин. Энергомашиностроение. 1962. №1. С. 6-9.
6. Богомолов Е.Н. О смыкании зон вторичных течений в турбинных решетках и его влияние на концевые потери. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №3. С. 25-31.
7. Богомолов Е.Н. Определение концевых потерь в турбинных решетках с учетом влияния входного пограничного слоя. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №2. С. 54-60.
8. Гукасова Е.А., Жуковский М.И., Завадовский А.М. и др. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин. Под. ред. В.С. Жуковского и С.С. Кутателадзе. М.: Госэнергоиздат, 1960. 340 с.
9. Дейч М.Е., Лазарев Л.Я., Полникова Т.В. Влияние периодической нестационарности на энергетические характеристики направляющих решеток. Труды МЭИ. 1974. Вып. 203. С. 24-27.
10. Чжен П. Управление отрывом потока. М: Мир, 1979. 552 с.
11. Чжен, Линь Жан-чао, Оу Жен-ву. Полностью развитое ламинарное течение в криволинейных каналах прямоугольного поперечного сечения. Труды амер. общ. инженеров-механиков: Теоретические основы инженерных расчетов. 1976. №1. С. 149-156.

12. Nippetr H. Uber den Stromungsverlust in gekrummten Kanalen. Forsch. Auf d. Geb. D. Ing. Wes., 1929,320 H.
13. Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.
14. Zagzoule M., Cathalifaud P., Cousteix J., Mauss J. Uniformly valid asymptotic flow analysis in curved channels. - Physics of Fluids 24, 013601 (2012)
15. Lowder J.R. A. Boundary layer control device.- F2R(F15D 1/12, F 01D 5/14), № 2032048, 1979.

References

1. Rassokhin, V.A. Turbiny konstruksii LPI: Preimushchestva, kharakteristiki, opyt razrabotki i primeneniye. [LPI design turbines: Advantages, characteristics, development experience and applications] Trudy SP6GPU. 2004. № 491. С. 152-161.
2. Zabelin, N.A. Rakov G.L., Sebelev A.A. i dr. Vliyanie uplotneniy na effektivnost' maloraskhodnykh turbinnykh stupeney konstruksii LPI. [Effect of seals on efficiency of low-flow turbine stages of LPI design] Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SP6GPU. 2013. №3 (178). S. 32-41.
3. Kirillov I.I. Teoriya turbomashin. [Theory of turbomachines]. L.: Mashinostroeniye, 1972. 536 s.
4. Deych M.E. Tekhnicheskaya gazodinamika. [Technical gas dynamics] M.: Energiya, 1974. 592 s.
5. Deych M.E., Baranov V.A., Frolov V.V. i dr. Vliyanie vysoty lopatok na nekotorye kharakteristiki odnovenechnykh stupeney turbin. [Effect of Blade Height on Certain Characteristics of Single-Shaft Turbine Stages] Energomashinostroeniye. 1962. №1. S. 6-9.
6. Bogomolov E.N. O smykaniy zon vtorichnykh techeniy v turbinnykh reshetkakh i ego vliyanie na kontsevye poteri. [About closing of secondary current zones in turbine grids and its effect on end losses] Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №3. S. 25-31.
7. Bogomolov E.N. Opredeleniye kontsevykh poter' v turbinnykh reshetkakh s uchetom vliyaniya vkhodnogo pogranichnogo sloya [Determination of end losses in turbine grids taking into account the influence of the input boundary layer]. Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №2. S. 54-60.
8. Gukasova E.A., Zhukovskiy M.I., Zavadovskiy A.M. i dr. Aerodinamicheskoye sovershenstvovaniye lopatochnykh apparatov parovykh i gazovykh turbin. [Aerodynamic improvement of steam and gas turbine blades] Pod. red. V.S. Zhukovskogo i S.S. Kutateladze. M.: Gosenergoizdat, 1960. 340 s.
9. Deych M.E., Lazarev L.Ya., Polnikova T.V. Vliyanie periodicheskoy nestatsionarnosti na energeticheskie kharakteristiki napravlyayushchikh reshetok. [Effect of periodic non-stability on energy characteristics of guide grates] Trudy MEI. 1974. Vyp. 203. S. 24-27.
10. Chzhen P. Upravleniye otryvom potoka [Management of a stream separation]. M: Mir, 1979. 552 s.
11. Chzhen, Lin' Zhan-chao, Ou Zhen-vu Polnost'yu razvitoe laminarnoye techeniye v krivolineynykh kanalakh pryamougol'nogo poperechnogo secheniya. [Fully developed laminar flow in curved channels of rectangular cross-section] Trudy amer. obshch. inzhenerov-mekhanikov: Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov. 1976. №1. S. 149-156.
12. Nippetr H. Uber den Stromungsverlust in gekrummten Kanalen. Forsch. Auf d. Geb. D. Ing. Wes., 1929,320 H.
13. Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.
14. Zagzoule M., Cathalifaud P., Cousteix J., Mauss J. Uniformly valid asymptotic flow analysis in curved channels. - Physics of Fluids 24, 013601 (2012)
15. Lowder J.R. A. Boundary layer control device.- F2R(F15D 1/12, F 01D 5/14), № 2032048, 1979.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52-б e-mail: turboroom@yandex.ru

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52-б e-mail: forsimashov@yandex.ru.

Sergei V. Chekhranov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Marine Power Systems Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok 690087, Russian Federation e-mail: turboroom@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.057
УДК 629.127 (621.165)

Определение расходных характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми прямоугольными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин

Р.Р. Симашов¹, С.В. Чехранов¹, И.Н. Ханькович¹

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В работе приводятся обобщающие зависимости коэффициентов расхода сопловых аппаратов с сверхзвуковыми прямоугольными соплами в широком диапазоне изменения определяющих геометрических и режимных параметров, базирующиеся на экспериментальном материале по коэффициентам расхода для транс- и дозвуковых решеток профилей. Получены эмпирические формулы, учитывающие влияние степени конфузурности, относительной высоты сопел и числа Рейнольдса на коэффициент расхода соплового аппарата. Показано слабое влияние на коэффициент расхода относительного шага сопел в области его оптимальных значений определенных по минимуму потерь кинетической энергии и числа Маха. Переменные режимы работы сопла учитываются зависимостью относительного коэффициента расхода в функции от числа Рейнольдса. Полученные в работе эмпирические зависимости позволяют использовать их при моделировании переменных режимов и многорежимной оптимизации малорасходных турбин.

Ключевые слова: малорасходные турбины, переменные режимы, коэффициенты расхода, сопловые аппараты, сверхзвуковые прямоугольные сопла.

Determination of mass flow characteristics of supersonic rectangular nozzle diaphragms in modeling variable duties of low-consumption turbines

Rafail R. Simashov¹, Sergei V. Chekhranov¹, Ilya N. Khankovich¹

¹Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. The research introduces generalizing functions of mass flow rates in supersonic rectangular nozzle diaphragms in wide variation range of controlling geometry and duty parameters, based on experimental material on the mass flow rates for trans- and subsonic cascades. Empirical functions which take into account influence of convergence ratio, the relative height of the nozzles and the Reynolds number on the mass flow rate of nozzle diaphragms are obtained. It is shown that the relative nozzle step in the area of its optimal values determined from the minimum kinetic energy loss and Mach number slightly effects on the mass flow rate. Variable duties of the nozzle are taken into account by the dependence of the relative mass flow rate from the Reynolds number. The empirical dependences obtained in the paper allow using them in modeling variable duties and multimode optimization of low-consumption turbines.

Key words: low-consumption turbines, variable duties, mass flow rate, nozzle diaphragms, supersonic rectangular nozzles.

Введение

Реальная картина течения в элементах проточной части (ПЧ) отличается от идеальной. Поэтому при расчете расхода рабочего тела необходимо учитывать действительный характер течения рабочего тела в каналах. Наличие пограничного слоя на обводах профилей, неравномерность полей давлений и скоростей в поперечном сечении канала, вторичные токи и ряд других трудно учитываемых факторов приводит к тому, что действительный расход отличается от теоретического. Поэтому с целью повышения достоверности расчета по математической модели сверхзвуковых малорасходных турбин (МРТ) при расчете расходных характеристик ступени вводятся коэффициенты расхода, равные отношению действительного расхода к теоретическому

$$\mu = G / G_t .$$

Значения μ зависят от того, каким образом ведется определение теоретического расхода: через площадь горловых сечений и теоретические параметры за решеткой, через площадь горловых сечений и теоретические параметры в этих сечениях, через площадь выходного сечения и теоретические параметры в этом сечении [1, 2].

В практике тепловых расчетов на заводах-изготовителях используются все три способа определения расхода рабочего тела через элементы ПЧ ступени. Определяющими факторами при выборе расходной характеристики решетки или канала являются надежность опытных данных, по которым она рассчитывается, геометрические особенности сверхзвуковых МРТ и наличие в модели необходимой информации для расчёта.

В наибольшей степени этим требованиям соответствует коэффициент расхода определённый по параметрам горловых сечений, поэтому для построения обобщающей зависимости для определения μ будем использовать только соответствующий экспериментальный материал.

При построении зависимостей для расчёта μ необходимо соблюдать следующие условия: точность модели не должна выходить за пределы точности измерений, реальные (при производстве, монтаже, во время эксплуатации) отклонения в размерах, шероховатости, которые влияют на расходные характеристики, нужно учитывать. По данным работ [2, 3, 4, 5, 6] точность определения μ сопел МРТ лежит в пределах $\pm 2\%$. В дальнейшем при построении модели будем исходить из этого факта. Анализ разработанных к настоящему

времени различными организациями конструкций сопловых аппаратов (СА) с прямоугольными соплами (ЦИАМ, ЦНИИ им. Крылова, КТЗ, МЭИ, СПбГМТУ, НЗЛ, МАИ, СПбПУ) показал, что профили, разработанные в МЭИ [7] в диапазоне изменения угла выхода потока из сопел $\alpha_{1k} = 8...20^\circ$, более эффективны на переменных режимах и не уступают в экономичности на расчетном режиме. Приведенная в работе [7] полуэмпирическая методика построения таких профилей содержит четкие рекомендации и позволяет использовать ее при проектировании СА малорасходных турбин с прямоугольными соплами. Содержащиеся в этой же работе экспериментальные данные позволили установить эмпирические зависимости для определения потерь кинетической энергии в соплах, которые могут использоваться при моделировании переменных режимов сверхзвуковых малорасходных турбин.

Анализ работ [1, 2, 7, 8, 9, 10, 11] показал, что специальных исследований по коэффициентам расхода μ сверхзвуковых сопловых решеток не проводилось. Однако концепция профилирования трансзвуковых и сверхзвуковых сопловых решеток, изложенная в работе [6] (сопловые решетки группы Б и В получается путем деформации выходного участка профиля группы А), позволяет для построения эмпирических зависимостей для определения μ сверхзвуковых сопловых решеток воспользоваться экспериментальными данными по коэффициентам расхода μ для решеток группы А и Б, так как форма дозвуковой части соплового канала одинаковая для групп А, Б, В.

Обобщения опытных данных по коэффициентам расхода прямоугольных сопел

Из анализа работ [1, 2, 7, 8, 9, 10, 11] следует, что в наиболее общем виде μ может быть представлен в зависимости от следующих параметров:

$$\mu = \mu(b/l, K, t/b, \bar{\Delta}_{кр}, M_{1t}, Re_{1t}), \quad (1)$$

где: $K = \sin \alpha_0 / \sin \alpha_{1k}$; b/l – отношение хорды профиля к высоте лопатки, t/b – относительный шаг лопаток; $\bar{\Delta}_{кр}$ – относительная толщина выходной кромки лопатки; M_{1t}, Re_{1t} – соответственно, число Маха и Рейнольдса.

Обобщения, представленные в указанных работах, отражают влияние основных факторов (за исключением [11], где рекомендуется принимать μ равным 0,97 и учитывается влияние на μ чисел, M_{1t}, Re_{1t} . В [8] учитывается влияние $b/l, K, Re_{1t}$; данные работы [2] позволяют определить μ в зависимости от $b/l, K, \bar{\Delta}_{кр}, Re_{1t}$; в работе [10] приводится зависимость μ от параметра b/l , а влияние чисел M_{1t}, Re_{1t} рекомендуется учитывать по данным работ [11, 7]; обобщения МЭИ [11] позволяют определять μ , в зависимости от $b/l, M_{1t}, Re_{1t}$.

Сравнительный анализ показывает, что для учета влияния одних и тех же факторов в различных работах используются разные опытные зависимости. Так, в работе [8] двухпараметрическая графическая

зависимость $\mu(b/l, K)$ существенно отличается от такой же зависимости, представленной в работах [2, 7] (разница в значениях μ при равных b/l и K более 0,02). В работах [10, 11] не учитывается влияние степени конфузурности K , хотя при $b/l > 2$ при изменении α_{1k} в пределах $8...22^\circ$ ($K \approx 3...7$) изменение μ достигает 0,02 и более абсолютных единиц. Из всех перечисленных работ только в двух [8, 11] приведены обобщенные зависимости, учитывающие влияние числа Re_{1t} , в остальных же приводятся графики влияния числа Re_{1t} на конкретные решетки. Сравнение опытных данных, взятых в работах [2, 7, 9] по влиянию Re_{1t} , с рассчитанными по зависимости из работы [11] показало неудовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных μ . Зависимость, представленная в работе [8], получена путем аппроксимации опытных данных из работы [2] и, по сути, является зависимостью для конкретной решетки.

Таким образом, невозможно применить в чистом виде одно из указанных обобщений в задачах многорежимной оптимизации МРТ, не обходим синтез имеющихся зависимостей с целью создания модели для определения коэффициента μ , пригодной для решения задач многорежимной оптимизации МРТ.

Из всей совокупности влияющих параметров (1) основными определяющими параметрами являются [2, 7]: $b/l, K$ и Re_{1t} . Влияние остальных конструктивных и режимных параметров находится в пределах области точности эксперимента и ими можно пренебречь. Так, влияние относительного шага на коэффициент расхода по данным работы [1] не превышает $\pm 0,0075$ абсолютных значений относительно среднего значения ($t/b = 0,65$) в области оптимальных значений $t/b = 0,6...0,9$ при изменении b/l в пределах $0...3,0$.

Увеличение коэффициента расхода с ростом числа M_{1t} от 0,4 до 1,0 по данным [11] составляет 0,005, и дальнейший рост числа M_{1t} не приводит к изменению μ [11], а по данным [12] это увеличение составляет 0,02. Это связано с тем, что при докритических скоростях в диапазоне чисел M_{1t} от 0,8...1,0 рост коэффициента μ связан в основном с более интенсивным падением давления в минимальном сечении по сравнению с параметрами за решеткой. Так как для докритических режимов теоретический расход подсчитывается по параметрам за решеткой, уменьшение давления в минимальных сечениях каналов приведет к росту μ . Второй причиной, вызывающей рост μ , является утоньшение пограничного слоя под действием разности давлений на выходном участке сопла (происходит "сброс" пограничного слоя [3, 9, 12]).

Описанные причины увеличения μ с ростом M_{1t} в большей степени проявляются для дозвуковых профилей [12] и в меньшей для трансзвуковых [11], что объясняется формой

профиля в косом срезе [13]: с плавной кривизной - для дозвуковых и прямолинейной - для трансзвуковых. Для трансзвуковых решеток, имеющих вблизи выходного сечения сходящийся-расходящийся канал, увеличение коэффициента μ с ростом M_{1t} вообще не наблюдается [13]. Поэтому для сверхзвуковых сопловых решеток с небольшим расширением канала после критического сечения влияние числа M_{1t} на μ отсутствует и в модели не учитывается. Это подтверждается исследованиями [4] СА осевого типа со сверхзвуковыми соплами прямоугольного сечения, а также исследованиями осесимметричных сопел (ОС) и СА с ОС [14].

Об учете влияния на μ относительной кромки $\Delta_{кр}$ для сверхзвуковых расширяющихся решеток говорить вообще не приходится, так как наличие расширяющейся части исключает воздействие выходных кромок на параметры потока и характеристики пограничного слоя в горле.

Эмпирические зависимости коэффициента расхода прямоугольных сверхзвуковых сопел

Математическую модель для определения μ в зависимости от основных определяющих факторов $b/l, K$ и Re_{1t} получим в виде

$$\mu = \mu(b/l, K) \cdot K_{Re} \quad (2)$$

Двухпараметрическая зависимость $\mu(b/l, K)$ представлена на рис.1 [2, 7]. При получении этой зависимости авторы указанных работ определяли расход по параметрам в минимальном сечении. Коэффициенты расхода относятся к горловым сечениям сопловой решетки, что, как уже указывалось, позволяет наиболее точно определить коэффициент расхода μ в эксперименте, а также использовать эту зависимость для расчета μ сверхзвуковых сопловых решеток.

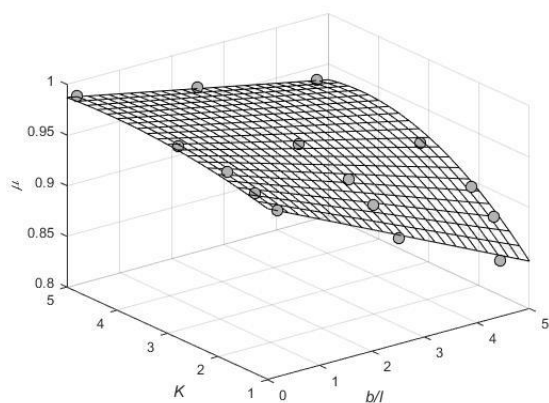


Рис. 1. Зависимость коэффициента расхода прямоугольных сопел от относительной высоты и конфузорности канала: — — расчет; ● — эксперимент

С ростом K коэффициент расхода сопловой решетки интенсивно увеличивается вплоть до значения $K \approx 3.0$. В дальнейшем рост μ замедляется с выходом на практически горизонтальный участок при значении $K \approx 5.0$. Аналогичный характер зависимости μ от степени

поджатия потока на входе наблюдается для осесимметричных сопел с профилированной дозвуковой частью (величина K также равна отношению площадей на входе и выходе из решетки), что подтверждает справедливость такого подхода.

Представленная на рис. 1 двухпараметрическая зависимость $\mu = \mu(b/l, K)$ хорошо аппроксимируется квадратичным полиномом:

$$\mu = 0.9536 - 0.0339 \frac{b}{l} + 0.0174K + 0.0107 \frac{b}{l} K - 0.0021K^2 - 0.0012 \frac{b}{l} K^2 \quad (3)$$

Так как в сверхзвуковых решетках коэффициент расхода зависит только от потерь в суживающейся части канала, то, чтобы воспользоваться формулой (3) и повысить точность расчета, в нее необходимо подставлять параметр b/l за минусом относительной протяженности сверхзвуковой (расширяющейся) части l_p/l , где l_p - длина расширяющейся части канала, вычисляемая по формуле [7] $l_p = (\bar{f}_c - 1) / \text{tg}(\delta/2)$. Здесь δ - угол отклонения потока при расширении от $M = 1,0$ до $M = M_{1t}$, определяется по известным формулам [9]. Число M_{1t} , определяется численно из уравнения $q(M_{1t}) = 1/\bar{f}_c$. Конфузорность соплового канала находится по формуле $K = t/a_{кр}$ (так как $\alpha_0 = 90^\circ$ и $l = \text{idem}$ по длине канала).

Обобщающая зависимость влияния числа Re представлена на рис. 2 в виде поправочного коэффициента K_{Re} и описывается формулой

$$K_{Re} = 1.0059 - \frac{0.0782}{(Re_{кр} \cdot 10^{-5})^{1.45}} \quad (4)$$

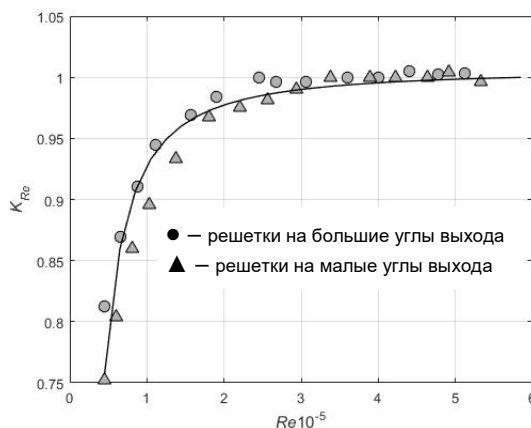


Рис. 2. Влияние числа Рейнольдса на коэффициент расхода прямоугольных сопел

Формула (4) получена путем аппроксимации экспериментальных данных [7, 9] и отражает влияние числа Re на коэффициент расхода μ сопловых решеток с различными углами выхода потока α_{1k} (при $\alpha_0 = 90^\circ$, $t/b = \text{opt}$). Сравнение опытных данных из работы [2] с расчетом по формуле (4) показало, что разница лежит в пределах точности

эксперимента и не превышает 2% абсолютных значений.

Такой результат можно считать удовлетворительным, так как при серийном изготовлении сопловых аппаратов МРТ площадь горлового сечения может изменяться в пределах допусков до $\pm 1...2\%$.

Число Re подсчитывается по параметрам потока в горловом сечении решетки, за характерный размер принимается хорда профиля за минусом длины сверхзвуковой части l_p .

Заключение

Приведенные обобщающие зависимости (3) и (4) отражают влияние на коэффициент расхода в прямоугольных сверхзвуковых соплах определяющих параметров K , b/l , $Re_{кр}$ и применимы для использования при моделировании переменных режимов и решении задач многорежимной оптимизации МРТ. Данные зависимости справедливы и обладают достаточной достоверностью в следующем диапазоне изменения геометрических параметров: $\alpha_{1k} = 8...22^\circ$; $K = 1.0...7.0$; $b/l \leq 4.5$; $\alpha_0 = 90^\circ$; $t/b = 0.6...0.9$. Влияние числа Re учитывается при $Re_{кр} \leq 6 \cdot 10^5$.

Литература

1. Дейч М.Е., Трояновский Б.М. Исследование и расчеты ступеней осевых турбин. М.: Машиностроение, 1964. 628 с.
2. Филиппов Г.А., Пряхин В.В. К расчету расходных характеристик сопловых аппаратов. Теплоэнергетика. 1965. №11. С.29-34.
3. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979. 268 с.
4. Родин К.Г., Носов В.В. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов парциальных сверхзвуковых турбин. Изв. вуз. Энергетика. 1981. №1. С. 107-110.
5. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Симашов Р.Р. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока в составе осевой малорасходной турбины. Судостроение. 2009. №6. С. 56-58.
6. Фершалов Ю.Я., Чехранов С.В. Статические испытания сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока. Судостроение. 2005. №5. С. 54-56.
7. Дейч М.Е., Филиппов Г.А., Лазарев Л.Я. Атлас профилей решеток осевых турбин. М.: Машгиз, 1965. 96 с.
8. Абрамов В.И., Филиппов Г.А., Фролов В.В. Тепловой расчет турбин. М.: Машиностроение, 1974. 184 с.
9. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Госэнергоиздат, 1962. 671 с.
10. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоиздат, 1982. 496 с.
11. Щегляев А.В. Паровые турбины: Теория теплового процесса и конструкция турбин. М. Энергоатомиздат, 1993. С.152-155
12. Филиппов Г.А., Поваров О.А., Пряхин В.В. Исследования и расчеты турбин влажного пара. М.: Энергия, 1973. 232 с.
13. Венедиктов В.Д. Газодинамика охлаждаемых турбин. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
14. Юсупов Э.И. Исследование некоторых методов повышения КПД одновенечных сверхзвуковых парциальных турбин: Дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛКИ, 1970. 168 с.

References

1. Deych M.E., Troyanovskiy B.M. Issledovanie i raschety stupeney osevykh turbin [Research and calculation of axial-flow turbine stages]. M.: Mashinostroenie, 1964. 628 s.
2. Filippov G.A., Pryakhin V.V. K raschetu raskhodnykh kharakteristik soplovykh apparatov [For the calculation of the metering characteristics of nozzle diaphragms]. Teploenergetika. 1965. №11. S.29-34.
3. Natalevich A.S. Vozdushnye mikroturbiny [Air microturbines]. M.: Mashinostroenie, 1979. 268 s.
4. Rodin K.G., Nosov V.V. Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov partsial'nykh sverkhzvukovykh turbin [Gas dynamics characteristics of nozzle diaphragms of partial supersonic turbines]. Izv. vuz. Energetika. 1981. №1. S. 107-110.
5. Fershalov Yu.Ya., Fershalov A.Yu., Simashov R.R. Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov s malymi uglami vykhoda potoka v sostave osevoy maloraskhodnoy turbiny [Gas dynamic characteristics of nozzle diaphragms with small nozzle-stream angles as part of axial-flow low-consumption turbine]. Sudostroenie. 2009. №6. S. 56-58.
6. Fershalov Yu.Ya., Chekhranov S.V. Sticheskie ispytaniya soplovykh apparatov s malymi uglami vykhoda potoka [Static tests of nozzle diaphragms with small nozzle-stream angle]. Sudostroenie. 2005. №5. S. 54-56.
7. Deych M.E., Filippov G.A., Lazarev L.Ya. Atlas profiley reshetok osevykh turbin [Atlas of profiles of axial-flow turbines lattices]. M.: Mashgiz, 1965. 96 s.
8. Abramov V.I., Filippov G.A., Frolov V.V. Teplovy raschet turbin [Heat calculation of turbines]. M.: Mashinostroenie, 1974. 184 s.
9. Deych M.E. Tekhnicheskaya gazodinamika [Engineering gas dynamics]. M.: Gosenergoizdat, 1962. 671 s.
10. Samoylovich G.S., Troyanovskiy B.M. Peremennye i perekhodnye rezhimy v parovykh turbinakh [Variable and transient duties of steam turbines]. M.: Energoizdat, 1982. 496 s.
11. Shcheglyayev A.V. Parovye turbiny: Teoriya teplovogo protsessa i konstruktziya turbin [Steam turbines: Theory of thermal process and turbines design]. M. Energoatomizdat, 1993. S.152-155

12. Filippov G.A., Povarov O.A., Pryakhin V.V. Issledovaniya i raschety turbin vlazhnogo para [Research and calculation of wet steam turbines]. M.: Energiya, 1973. 232 s.
13. Venediktov V.D. Gazodinamika okhlazhdaemykh turbin [Cool turbines gas dynamics]. M.: Mashinostroenie, 1990. 240 s.
14. Yusupov E.I. Issledovanie nekotorykh metodov povysheniya KPD odnovenechnykh sverkhzvukovykh partial'nykh turbin [Research of some methods for increasing the efficiency of single-walled supersonic partial turbines]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LKI, 1970. 168 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

Илья Николаевич Ханькович, старший преподаватель кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: ilbechhan@mail.ru

Ilya N. Khankovich, Chief Lecturer of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok 690087, Russian Federation, e-mail: ilbechhan@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.075

УДК 621.43.013 – 629.3

Стохастическая ячеистая модель очистки моторного масла от механических примесей объёмным фильтрованием

Г.П. Кича¹, Л.А. Семенюк¹, М.И. Тарасов¹¹Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Приведено описание ячеистой модели фильтрования, которая создавалась на сочетании вероятностно-статистических методов с точным описанием на основе физических законов поведения дисперсной фазы при сложном взаимодействии её с дисперсионной средой.

Выделены основные силы, действующие на частицу в потоке при фильтровании. Показано, что наибольшее воздействие на отсев оказывают силы Лондона-Ван-дер-Ваальса и электрокинетические, обусловленные полярными молекулами продуктов старения масла и моюще-диспергирующими присадками, которыми оно легируется. Выяснено, что в наименьшей степени на отсев влияют силы тяжести и Архимеда.

Объединение детерминированных и случайных воздействий на дисперсную фазу осуществлено на базе уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка. Показаны методы его формирования так, чтобы рассматриваемому случайному переносу частиц в поровом пространстве, идентифицированному совокупностью обобщенных координат и скоростей, соответствовало уравнение для многомерной плотности вероятности, отождествляемой с концентрацией дисперсной фазы.

Приведены расчётные формулы для компонентов скорости частиц, по которым можно рассчитать граничную траекторию, определить безразмерную координату и фракционный коэффициент отсева. Определены краевые условия стохастической задачи фильтрования. Записаны интегралы для расчета фракционного отсева через паток вероятности. Проанализированы возможности детерминированной и стохастической ячеистых моделей фильтрования, показана их адекватность.

Ключевые слова: фильтрование, стохастическое моделирование, марковские процессы, горюче-смазочные материалы, очистка топлив и масел, фракционный коэффициент отсева.

Stochastic cellular model clean motor oil from mechanical impurities by filtration bulk

Gennadiy P. Kicha¹, Liudmila A. Semeniuk¹, Maxim I. Tarasov¹¹Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy

Abstract. A description is given of a cellular filtering model that was created using a combination of probabilistic and statistical methods with an accurate description based on the physical laws of the behavior of the dispersed phase during its complex interaction with the dispersion medium.

The main forces acting on a particle in a stream during filtration are identified. It has been shown that the London-Van der Waals forces and electro kinetic forces caused by polar molecules of oil aging products and detergent-dispersant additives with which it is doped have the greatest impact on screening. It has been found that gravity and Archimedes force have the least effect on screening.

The combination of deterministic and random effects on the dispersed phase was carried out based on the Kolmogorov – Fokker – Planck equation. The methods of its formation are shown so that the equation for the multidimensional probability density, identified with the concentration of the dispersed phase, corresponds to the random particle transport in the pore space, identified by the set of generalized coordinates and velocities.

Calculation formulas are given for the particle velocity components by which one can calculate the boundary trajectory and determine the dimensionless coordinate and fractional dropout coefficient. The boundary conditions of the stochastic filtering problem are determined. The integrals for calculating the fractional dropout through the molasses of probability are recorded. The possibilities of deterministic and stochastic cellular filtration models are analyzed, and their adequacy is shown.

Key words: filtration, stochastic modeling, Markov processes, fuels and lubricants, fuel and oil purification, fractional dropout coefficient.

Введение

Форсирование судовых трюковых дизелей наддувом при применении в них тяжелых остаточных топлив, получаемых при термо-и каталитическом крекинге, привело к повышенному загрязнению масла механическими примесями. Последние включают продукты изнашивания дизеля и срабатывания присадок моторного масла (ММ), алюмосиликаты от сжигания низкосортных топлив [1]. Высокая зольность применяемых термостойких ММ увеличивает абразивность нерастворимых продуктов (НРП) и способствует повышенному

изнашиванию деталей цилиндра-поршневой группы двигателя [2].

Высокие моюще-диспергирующие и стабилизирующие свойства масел приводят к низкой эффективности удаления из них загрязнений средствами очистки. Поэтому для снижения уровня содержания в масле механических примесей широко применяются объёмные фильтры. Они обеспечивают глубокую очистку масла от мелкодисперсных НРП загрязнения. Для этой цели предпочтительно использовать гранулированные фильтровальные материалы (ФМ) различной физической основы, в том числе и из металло-керамики [3].

Так как в загрязнениях дизельных масел высока доля мелкодисперсной нерастворимой фазы роль диффузионных процессов в отсеке НРП довольно велика. Их учёт в процессе фильтрования рассмотрен в ячеистых моделях, разработанных для полнопоточных фильтров, использующих ФМ волоконной структуры [4]. Применительно к объёмному фильтрованию известны ячеистые модели, в которых диффузионными процессами пренебрегают [5].

Сложность учёта броуновской диффузии состоит в недостаточной полной идентификации сопротивления движению мелких частиц дисперсной фазы около препятствия. Стоксовские представления по сопротивлению движению дисперсной фазы (ДФ), полученные при обтекании суспензией единичного цилиндра или сферы, нарушаются из-за флуктуаций, вызываемых различными гидродинамическими факторами, изученными ещё недостаточно полно [5, 6].

В данной статье осуществляется попытка учесть движение через поровую структуру объёмного типа с последовательным расположением фильтровальных ячеек ансамбля частиц разного дисперсного состава с ярко выраженными химмотологическим (электрокинетическим) действием. Это относится к работающему загрязнённому механическими примесями ММ, имеющему в своём составе поверхностно активные компоненты смол, асфальтенов и моюще-диспергирующих присадок.

1. Моделирование движения частиц дисперсной фазы в фильтровальной ячейке при обтекании сферического коллектора

Объёмный ФМ может быть представлен поровой структурой, состоящей из отдельных ячеек со сферическим коллектором в каждой из них. Фильтруемая среда, содержащая механические примеси (частицы загрязнений), последовательно проходит через ячейки, при этом в каждой из них наблюдается осаждение частиц на коллектор. На выходе из ФМ фильтрат будет содержать меньшее количество загрязнений, зависящее от эффективности их задержания каждой ячейкой.

Выделенная ячейка со сферическим коллектором радиуса R_k и оболочкой, имеющей характерный размер (радиус) R_a , статистически определяются через пористость m материала по формуле $R_a = R_k(1-m)^{-1/2}$. При представлении элементарной ячейки кубом половин длины его стороны соответствует $b_a = R_k[\pi/6(1-m)]^{-1/3}$ [3]. При стеснённом движении в поровом пространстве дисперсной среды отдельные частицы из неё осаждаются на коллекторе. Их количество по отношению к числу частиц, поступающих в ячейку, будет определять коэффициент отсева.

Уравнение движения жидкости при обтекании сферы рассматривали по граничному условию непротекания при соприкосновении с коллектором. Приняты равными нулю радиальная скорость потока и касательные напряжения на границах жидкой ячейки. Для этих условий функция тока принимает вид [3, 5]

$$\psi_c = \frac{U}{2} R_k^2 \sin^2 \theta \left(\frac{K_1}{r} - K_2 r \right) + K_3 r^2 + K_4 r^4, \quad (1)$$

где U – скорость набегающего потока, м/с.

Функции $K_1 - K_4$ зависят от пористости ФМ [6]:

$$\left. \begin{aligned} \rho_m = (1-m)^{1/3}, w_m = 2 - 3\rho_m + 3\rho_m^5 - 2\rho_m^6, K_1 = w_m^{-1}, \\ K_2 = -(3 + 2\rho_m^5)/w_m, K_3 = (2 + 3\rho_m^5)/w_m, K_4 = -\rho_m^5/w_m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Скорость жидкости при обтекании сферического коллектора из-за симметричного течения относительно вертикальной оси может быть получена из выражения (1) с учётом формулы (2):

$$\vec{v} = -\left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi_c}{\partial \theta} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi_c}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta. \quad (3)$$

Радиальную v_r , и тангенциальную v_θ скорости находим по уравнениям [5, 7]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{v}_r = -U \cos \theta \left(\frac{K_1 R_k^3}{r^3} + \frac{K_2 R_k}{r} + K_3 + \frac{K_4 r^2}{R_k^2} \right); \\ \vec{v}_\theta = U \sin \theta \left(-\frac{K_1 R_k^3}{2r^3} + \frac{K_2 R_k}{2r} + K_3 + \frac{2K_4 r^2}{R_k^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Поле скорости, описываемое уравнением (4), для удобства последующих расчётов аппроксимировали полиномом второй степени [3, 5]:

$$\vec{v} = -A^s z^2 \vec{e}_r + (A_y^s y z + B_z^j + C^p z^2) \vec{e}_\theta,$$

где $A^s = \frac{\bar{A}^s U \cos \theta}{R_k^2}$, $A_y^s = \frac{\bar{A}^s U \sin \theta}{R_k^2}$, $B_z^j = \frac{\bar{B}^j U \sin \theta}{R_k}$,

$$C^p = \frac{\bar{C}^p U \sin \theta}{R_k^2}, \bar{A}^s = \bar{B}^j = \frac{3(1-p_m^5)}{w_m}, \bar{C}^p = \frac{3(1-4p_m^5)}{w_m},$$

$$y = r(\theta - \theta_0).$$

Поле скорости жидкости есть суперпозиция поля заторможенного потока по нормали и тангенциально к поверхности сферического коллектора (первое и второе слагаемое) с включением линейного и параболического полей сдвигового течения (соответственно третий и четвёртый компоненты).

Для квазистационарного процесса фильтрования силы и моменты, действующие на частицу ДФ в координатных направлениях r и θ (см. рис.1), должны находиться в равновесии. Вследствие симметрии задачи силы проявляются только в этих направлениях, спектр моментов действует нормально к плоскости чертежа.

На базе формул, приведённых в работе [3] уравнения равновесия сил и моментов запишутся в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} F_r^n + F_r^t + F_r^r + f_r^s + f_r^l + f_r^p + F_{Adr} + F_{DLr} + F_{gr} + F_{Ar} = 0; \\ F_\theta^n + F_\theta^t + F_\theta^r + f_\theta^s + f_\theta^l + f_\theta^p + F_{g\theta} + F_{A\theta} = 0; \\ T_\phi^n + T_\phi^t + T_\phi^r + t_\phi^s + t_\phi^l + t_\phi^p = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В системе (5) символами F_{Adr} , F_{DLr} , F_{gr} и F_{Ar} обозначены соответственно силы Лондона-Ван-дер-Ваальса (адгезии), электрокинетического (химмотологического), взаимодействия тяжести и Архимеда. Их представления идентификация подробно описаны в [3, 5].

Символами F , f и T , t в уравнениях обозначены силы и моменты вязкого сопротивления,

действующие соответственно на движущуюся частицу в движущейся жидкости. Верхние индексы характеризуют следующее: n, t – частица перемещается по нормали и касательной к поверхности коллектора; r – частица движется с осью вращения, параллельной поверхности; S представляет осимметричный заторможенный поток относительно коллектора; l, p дают представление сдвигового течения соответственно с линейным и параболическим полем скоростей.

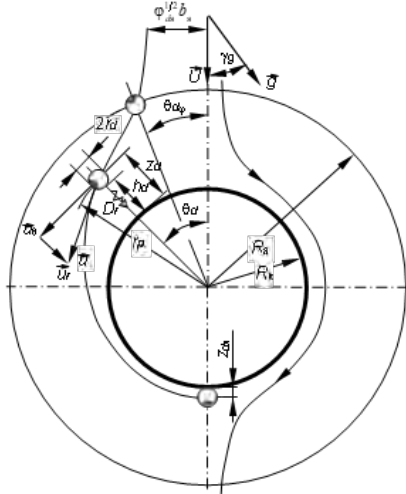


Рис. 1. Схема ячеистой модели фильтрации

Для расчёта сил и моментов, действующих на движущуюся частицу радиуса r_d , в неограниченном потоке с вязкостью жидкости μ_m , при низких числах Рейнольдса дисперсионной среды и векторе скорости $D\Phi \vec{u}$, согласно Стоксу использованы выражения [3, 5]:

$$\vec{F}_c = 6\pi\mu_m r_d \vec{u}, \vec{T}_c = 8\pi\mu_m r_d^3 d\vec{u}.$$

Однако, при движении частицы возле препятствия (коллектора) возникает торможение из-за не одинаковых давлений и дополнительных касательных напряжений вокруг частицы. Эффекты вязкости вследствие влияния препятствия на гидродинамические процессы учтены безразмерными коэффициентами, представленными в системе (5). Их идентификация осуществлена по формулам, представленным в табл. 1 [3, 5].

Таблица 1

Формулы для расчета сил и моментов вязкого сопротивления

Координатные направления		
$F_r^n = -\bar{F}_r^n 6\pi\mu_m r_d (u_r)$	$F_\theta^n = 0$	$T_\phi^n = 0$
$F_r^t = 0$	$F_\theta^t = -\bar{F}_\theta^t 6\pi\mu_m r_d (u_\theta)$	$T_\phi^t = -\bar{F}_\phi^t 8\pi\mu_m r_d^3 \left(\frac{u_\theta}{r_d}\right)$
$F_r^r = 0$	$F_\theta^r = -\bar{F}_\theta^r 6\pi\mu_m r_d^2 (\omega_d)$	$T_\phi^r = -\bar{F}_\phi^r 8\pi\mu_m r_d^3 (\omega_d)$
$f_r^s = -\bar{f}_r^s 6\pi\mu_m r_d \times \left(U\bar{A}^s \frac{z_d^2}{R_k^2} \cos\theta_d \right)^{**}$	$f_\theta^s = 0$	$t_\phi^s = 0$
$f_r^l = 0$	$f_\theta^l = -\bar{f}_\theta^l 6\pi\mu_m r_d \times \left(U\bar{B}^l \frac{z_d}{R_k} \sin\theta_d \right)$	$f_\phi^l = -\bar{f}_\phi^l 8\pi\mu_m r_d^3 \times \left(U\bar{B}^l \frac{z_d}{R_k r_d} \sin\theta_d \right)$
$f_r^p = 0$	$f_\theta^p = -\bar{f}_\theta^p 6\pi\mu_m r_d \times \left(U\bar{C}^p \frac{z_d^2}{R_k^2} \sin\theta_d \right)$	$f_\phi^p = -\bar{f}_\phi^p 8\pi\mu_m r_d^3 \times \left(U\bar{C}^p \frac{z_d^2}{R_k^2 r_d} \sin\theta_d \right)$
* Величины с чертой – поправочные коэффициенты к закону Стокса, учитывающие влияние коллектора для сил и моментов. ** Выражения в скобках – скорость и частота вращения (завихренность) частицы или жидкости для координаты $z = z_d$.		

Закон Стокса применён также при формировании суперпозиции сложного движения, когда рассматривались составляющие сил, действующих на неподвижную частицу. Из системы уравнений (5), проецируя на r и θ

выраженные известными формулами [8] внешние силы совместно с компонентами \vec{F}_c и \vec{T}_c после приведения их к безразмерному виду имеем:

$$\left. \begin{aligned} N_{DL} \{E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]\} \frac{\exp[E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]} - \bar{F}_r^n \bar{u}_r - \frac{N_{Ad}}{(\bar{z}_d - 1)^2 (\bar{z}_d + 1)^2} - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d = 0; \\ N_{gA} \sin(\gamma_g + \theta_d) - \bar{F}_\theta^i \bar{u}_\theta + \bar{F}_\theta^r \bar{\omega}_d + \bar{f}_\theta^l \bar{B}' \bar{z}_d \bar{r}_d \sin \theta_d + \bar{f}_\theta^p \bar{C}^p \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \sin \theta_d = 0; \\ \bar{T}_\phi^i \bar{u}_\theta - \bar{T}_\phi^r \bar{\omega}_d + \bar{f}_\phi^l \bar{B}' \bar{z}_d \bar{r}_d \sin \theta_d + \bar{f}_\phi^p \bar{C}^p \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \sin \theta_d = 0. \end{aligned} \right\} (6)$$

Приведение к безразмерному виду позволило выделить группы отсева, действующие на отфильтровываемую частицу. Адгезионная $N_{Ad} = Q_r / 9\pi\mu_m r_d^2 U$, химмотологическая $N_{DL} = \epsilon k_D (\zeta_k^2 + \zeta_d^2) / 12\pi\mu_m U$ и гравитационная $N_{gA} = 2r_d^2(\rho_d - \rho_m)g / 9\mu_m U$ группы являются соответственно отношением вандерваальсовых, электрокинетических двойного слоя и гравитационных сил к силе вязкого сопротивления [8, 9].

Электрокинетический (химмотологический) симплекс $E_{kd} = 2\zeta_k \zeta_d / (\zeta_k^2 + \zeta_d^2)$ зависит от потенциалов частицы и коллектора. Симплекс

$$\bar{u}_r = \frac{1}{\bar{F}_r^n} \left[N_{DL} \{E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]\} \frac{\exp[-E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{z}_d - 1)]} - \frac{N_{Ad}}{(\bar{z}_d - 1)^2 (\bar{z}_d + 1)^2} - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d \right]; (7)$$

$$\bar{u}_\theta = \frac{\sin \theta_d}{\bar{T}_\phi^r \bar{F}_\theta^i - \bar{T}_\phi^l \bar{F}_\theta^r} \left[\frac{\bar{T}_\phi^r N_{gA} \sin(\gamma_g + \theta_d)}{\sin \theta_d} + \bar{B}' \bar{z}_d \bar{r}_d (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^l + \bar{F}_\theta^r \bar{f}_\theta^l) + \bar{C}^p \bar{z}_d^2 \bar{r}_d^2 (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^p + \bar{F}_\theta^r \bar{f}_\theta^p) \right]. (8)$$

Эффективность ячеистой модели на основе детерминированного подхода рассчитываем путем построения траектории движения частиц ДФ при обтекании сферического коллектора суспензией. Так как $\bar{u}_r = d\bar{r}_p / d\bar{t}$ и $\bar{u}_\theta = \bar{r}_p d\theta_d / d\bar{t}$, выразив $\bar{z}_d = \bar{r}_p - \bar{R}_k$, после деления (7) на (8) и последующего преобразования находим:

$$\left(\frac{N_{DL} \{E_{kd} - \exp[-E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)]\} \frac{\exp[-E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)]}{1 - \exp[-2E_{DL}(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)]} - \frac{N_{Ad}}{(\bar{r}_p - \bar{R}_k - 1)^2 (\bar{r}_p - \bar{R}_k + 1)^2} - N_{gA} \cos(\gamma_g + \theta_d) - \bar{f}_r^s \bar{A}^s (\bar{r}_p - \bar{R}_k)^2 \bar{r}_d^2 \cos \theta_d}{\bar{C}^p (\bar{r}_p - \bar{R}_k)^2 \bar{r}_d^2 (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^p + \bar{F}_\theta^r \bar{f}_\theta^p) + \bar{B}' (\bar{r}_p - \bar{R}_k) \bar{r}_d (\bar{T}_\phi^r \bar{f}_\theta^l + \bar{F}_\theta^r \bar{f}_\theta^l) + \bar{T}_\phi^r N_{gA} \frac{\sin(\gamma_g + \theta_d)}{\sin \theta_d}} \right) \frac{\bar{r}_p (\bar{T}_\phi^r \bar{F}_\theta^i - \bar{T}_\phi^l \bar{F}_\theta^r)}{\bar{F}_r^n \sin \theta_d}. (9)$$

Задерживающая способность фильтровальной ячейки определяется расчётом траектории движения частицы на границе захвата (см. рис.1). Граничная траектория как бы разделяет поток на две составляющие – внутреннюю (зону отсева) и наружную. Внутренняя, располагаемая между вертикальной осью симметрии и граничной траекторией, из которой частицы оседают на коллектор. Наружная зона формирует поток, из которого частицы заданного размера за один проход через фильтровальную ячейку не удаляются.

Характеристикой границы захвата служит траектория, заканчивающаяся в точке с координатами $\bar{r}_p - \bar{r}_{пт}$ и $\theta_d = \theta_{пт}$. Для большинства случаев вполне допустимо считать, что координата $\bar{r}_{пт}$ равна $\bar{R}_k + 1$.

двойного слоя $E_{DL} = kDr_d$ использован для представления F_{DL} в безразмерном виде [10]. Влияние E_{kd} и E_{DL} на отсев частиц при движении суспензии через фильтровальную ячейку в значительной степени зависит от наличия в масле полярно активных веществ и особенно значительно при очистке обводненных масел. После исключения параметра $\bar{\omega}_d$, решая систему уравнений (6) относительно \bar{u}_r и \bar{u}_θ , получили выражение для скорости движения частицы при обтекании жидкостью сферического коллектора:

По координате пересечения граничной траектории контуров (радиуса \bar{R}_k) фильтровальной ячейки можно судить о её задерживающей способности. Фракционный коэффициент отсева определяется отношением потока внутри граничной траектории на входе в ячейку к объёму дисперсной среды, поступающей в неё в единицу времени. При одинаковом значении скорости U набегающего потока в фильтровальную ячейку для зоны захвата и проскока имеем

$$\Phi_{отс} = \left(\frac{b_\phi}{b_r} \right)^2 = \sin^2 \theta_{отс}. (10)$$

Фракционный отсев через ФМ, состоящий из последовательно располагаемых ячеек

(фильтровальных слоёв), определяется по выражению

$$\varphi_{\text{дф}} = 1 - \prod_{i=1}^{n_s} (1 - \varphi_{\text{дфи}}). \quad (11)$$

Линейную b_φ и угловую $\theta_{\text{дф}}$ координаты отсева находят построением граничной траектории в результате решения уравнения (9). Построение граничной траектории осуществляли по результатам решения обыкновенного дифференциального уравнения численными методами [3, 8]. Использовали схему Рунга-Кутты четвертого порядка с левыми разностями по времени при начальных условиях $\bar{r}_{\text{рп}} = \bar{R}_k + 1, \theta_d = \pi$.

Стохастичность процесса отсева ДФ при объёмном фильтровании для мелких частиц ($\bar{r}_d < 0,2$) главным образом вызывается броуновской диффузией. Коэффициент диффузии в радиальном D_r и тангенциальном D_θ направлениях определяется через постоянную Больцмана k_B по соотношению [9, 10]:

$$D_r = D_\theta = \frac{k_B T_m}{6\pi\mu_m r_d}. \quad (12)$$

Этот показатель зависит от температуры T_m и вязкости μ_m масла. Из-за большой доли мелкодисперсных нерастворимых загрязнений в ММ учёт диффузионного процесса для этой среды весьма важен. Кроме того, на стохастичность фильтрования существенным образом влияют флуктуации скорости движения частиц ДФ из-за действия пристенных эффектов.

Ранее [3, 9] была доказана возможность использования уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка для возможности стохастического моделирования фильтровального процесса.

Если считать его случайным марковским [9], то в этом случае плотность вероятности W , по терминологии Маркова, может отождествляться с относительной концентрацией ДФ в элементарном объёме рассматриваемого фазового пространства.

Если диффузионным процессом в направлении θ (см. рис.1) пренебречь, то стационарный процесс

фильтрования для ячейки со сферическим коллектором в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\bar{r}^2 \bar{u}^2 W) - \frac{\bar{r}}{\partial \theta} (\bar{u}_\theta W) + \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(r^2 \bar{D}_r \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right) = 0; \\ W|_{\bar{r}=\bar{R}_k} = 0; W \rightarrow 1 \text{ при } \bar{r} \rightarrow \infty. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Граничное условие $W|_{\bar{r}=\bar{R}_k} = 0$ означает полное «поглощение» частиц, коснувшихся коллектора. Плотность вероятности $W|_{\bar{r}=\bar{R}_k}$ (условная концентрация) частиц в потоке суспензии, поступающей в ячейку, принята равной единице.

Эффективность фильтрования рассчитывали потоком вероятности на коллектор:

$$\varphi_{\text{дф}} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\bar{R}_k}{\bar{R}_a} \right)^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(-\bar{u}_r W + \bar{D}_r \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right)_{\bar{r}=\bar{R}_k} d\theta d\alpha, \quad (14)$$

где α – третья координата сферической системы. При симметричном обтекании сферы относительно вертикальной оси (см. рис. 1), то фракционный коэффициент отсева соответствует

$$\varphi_{\text{дф}} = 2 \left(\frac{\bar{R}_k}{\bar{R}_a} \right)^2 \int_0^\pi \left(-\bar{u}_r W + \bar{D}_r \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right)_{\bar{r}=\bar{R}_k} d\theta. \quad (15)$$

Расчёт задерживающей способности фильтровальной ячейки по стохастической модели вели численными методами с использованием конечно-разностной схемы [9, 11]. Наиболее эффективным оказался метод переменных направлений с центральными разностями и расщеплением стохастического дифференциального уравнения по координатам r и θ (рис. 2). Используемые расчётные схемы устойчивы независимо от соотношения конвективных и диффузионных членов уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка.

Расчет эффективности объёмного фильтрования в широком диапазоне N_{Ad}, N_{DL} и N_{gA} показал его высокую результативность (табл. 2)

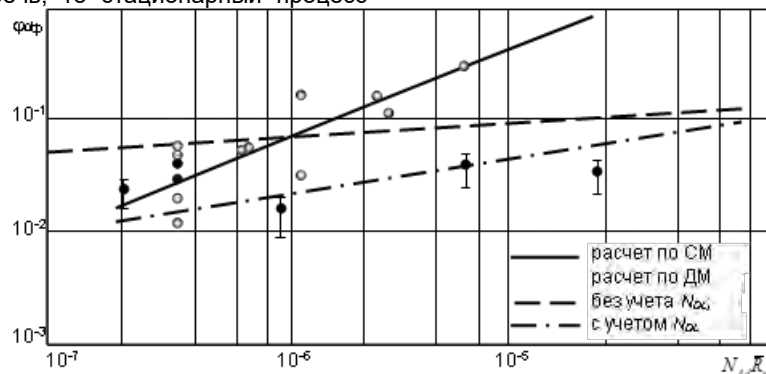


Рис. 2. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных ячеистой модели фильтрования (стохастической и детерминированной)

Расчетные (по ячеистой модели) и экспериментальные значения фракционного коэффициента отсева

Модель	N_{Ad}	N_{DL}	N_{gA}	\bar{r}_d	\bar{D}_r	Φ_{df}	Φ_{ds}
Стохастическая: формулы (11) и (14)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,08	$0,6 \cdot 10^{-2}$	6,3	$6 \pm 0,8$
	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,08	$0,6 \cdot 10^{-2}$	2,8	$3 \pm 0,5$
	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	12,7	12 ± 1
	3,6	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	23,2	21 ± 2
	3,6	$0,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	11,5	10 ± 1
Детерминированная: формулы (9),(10) и (11)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,08	$0,6 \cdot 10^{-2}$	3,4	$6 \pm 0,8$
	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,08	$0,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	$3 \pm 0,5$
	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	10,4	12 ± 1
	3,6	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	22,7	21 ± 2
	3,6	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	10,3	10 ± 1

2. Анализ результатов расчёта эффективности фильтрации по ячеистой модели

Проверка адекватности ячеистой (стохастическая и детерминированная) моделей фильтрации сопоставлением расчётных и экспериментальных данных показала удовлетворительные результаты (см. рис. 2) при отсеве мелкодисперсной фазы загрязнений. Оценка эффективности объёмного фильтрации оценивалась по суммарному фракционному коэффициенту отсева Φ_{df} , характеризующему разделяющую способность объёмного ФМ.

Эффективность фильтрации рассчитывалась как при действии химмотологической группы N_{DL} на отсев, так и без учёта её влияния на удаление нерастворимых примесей из масла. Фракционный коэффициент отсева при развитой диффузии точнее идентифицируется при $N_{DL}=0$, особенно при высоком значении N_{Ad} . Наличие N_{DL} ослабляет диффузионный отсев и уменьшает Φ_{df} . В этом случае силами отталкивания частицы от коллектора вследствие действия двойного электрического слоя на её поверхности пренебречь нельзя.

Расчётная и экспериментальная оценка (см. табл.2) фильтровальной эффективности различных объёмных ФМ в широком диапазоне действия групп отсева, размеров частиц и коллектора показала, что разработанные ячеистые модели на стохастическом и детерминированном подходе позволяют вполне удовлетворительно идентифицировать их разделительную способность по удалению из ММ механических примесей.

Детерминированную модель предпочтительно использовать при диффузионных числах Пекле Re_D больше $3 \cdot 10^2$. Установлено, что с увеличением \bar{r}_d ($\bar{r}_d > 0,3$) погрешность расчета фракционного коэффициента растёт.

Детерминированная модель при $\bar{D}_r < 0,3 \cdot 10^{-2}$ даёт разброс показателей Φ_{df} за пределами границ его экспериментального значения, определённого с доверительной вероятностью 95 %.

Расчёты показали, что принятая схема учёта флуктуаций скорости движения ДФ от действия пристенных эффектов себя оправдала. Химмотологический эффект отсева из-за действия

поверхностно активных веществ, находящихся в масле, необходимо учитывать обязательно. Анализ влияния гранулы N_{DL} на отсев частиц показал уменьшение отфильтровываемости ДФ при повышении концентрации в масле моюще-диспергирующих присадок.

Сравнение расчётных и экспериментальных значений Φ_{df} показал возможность полученных ячеистых моделей для расчёта эффективности объёмных фильтровальных структур и обоснования наиболее рациональных режимов их функционирования в зависимости от характеристик ДФ.

Разработанные модели дают возможность направленно формировать поровую структуру объёмных ФМ с целью интенсификации процесса фильтрации ММ.

Выводы

1. Предложена методика расчёта фракционного отсева механических примесей при детерминированном и стохастическом подходе к оценке эффективности очистки моторных масел объёмным фильтрованием. Показана перспективность идентификации фильтрации методами теории случайных марковских процессов, что позволяет решать задачу отсева загрязнений из масла с использованием общих законов движения частиц в дисперсионной среде при сложной гидродинамической обстановке.

2. Математическое описание перемещения дисперсной фазы в поровом пространстве выполнено с использованием закона Стокса и с введением поправок на стеснённость движения и пристенные эффекты. Перемещения частиц поровом пространстве оценены посредством суперпозиции найденных частных решений. Эффекты вязкости при движении частиц в поровом пространстве получены аппроксимацией линейного и параболического полей сдвигового течения, а также поля осесимметричного заторможенного потока. Используются функции тока для возмущённого обтекания коллектора в форме сферы.

3. Уточнённая теория фильтрации на основе адгезионного захвата, садиментации, диффузии и других задерживающих механизмов комплексно учитывает физико-механическое (электрокинетическое) взаимодействие

полидисперсной нерастворимой фазы загрязнений с фильтрующей перегородкой сложной структуры. Доказана адекватность полученной ячеистой модели и возможность использования её для идентификации

эффективности фильтров и управления структурой ФМ с целью создания маслоочистителей с высокими технико-экономическими характеристиками

Литература

1. Кича Г.П., Липин Г.М., Полоротов С.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ двигателя // Трение и износ. 1986. № 6. Т.7. С. 1068–1078.
2. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надёжкин А.В., Завадский С.А. Моделирование изнашивания судовых тронковых дизелей при использовании унифицированных моторных масел // Трение и износ. 2004. № 6. Т.25. С. 635–641.
3. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: монография. Владивосток: Изд-во мор. гос. ун-та, 2011. 372 с.
4. Кича Г.П., Семенюк Л.А., Надёжкин А.В. Пути повышения эффективности тонкой очистки моторного масла совершенствованием фильтровальных нетканых материалов в маслоочистителях судовых дизелей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия : Морская техника и технология. 2018. № 4. С. 31–41.
5. Tichy J.A. A model of lubrication filtration // Trans. ASME, J. Lubric. Technol. 1981. Vol. 103. N 1. P. 81–89.
6. Pajatakes A.C., Tien C., Turian R.M. A new model for granular porous media: Model formulation // AIChE J. 1973. Vol. 19. P. 58–66.
7. Rajagopalan R., Tien C. Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model // AIChE J. 1976. Vol. 22. N 3. P. 523–533.
8. Spielman L.A., Fitzpatrick J.A. Theory for particle collection under London and gravity forces // J. Col. Sci. 1973. Vol. 42. N 3. P. 607–623.
9. Воробьев Б.Н., Надёжкин А.В., Кича Г.П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3. Т.2. С. 112–121.
10. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Голенищев А.В. Стохастическая ячеистая модель очистки горюче-смазочных материалов ДВС фильтрованием // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 1. С. 246–251.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

References

1. Kicha G.P., Lipin G.M., Polorotov S.P. Tribotekhnicheskie kharakteristiki nerastvorimyykh produktov za-gryazneniya motornykh masel i ikh vliyanie na iznos dvigatelya [Tribotechnical characteristics of insoluble products of engine oil contamination and their impact on engine wear] // Trenie i iznos. 1986. № 6. T.7. S. 1068–1078.
2. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V., Zavadskiy S.A. Modelirovanie iznashivaniya sudovykh tron-kovykh dizeley pri ispol'zovanii unifitsirovannykh motornykh masel [Modeling the wear of marine diesel engines tankovykh when using unified motor oils] // Trenie i iznos. 2004. № 6. T.25. S. 635–641.
3. Kicha G.P. Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyakh: monografiya [Resource-saving oil use in marine diesels] / G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezhkin. Vladivostok: Izd-vo mor. gos. un-ta, 2011. 372 s.
4. Kicha G.P., Semenyuk L.A., Nadezhkin A.V. Puti povysheniya effektivnosti tonkoy ochistki motornogo masla sovershenstvovaniem fil'troval'nykh netkanykh materialov v masloochistitelyakh sudovykh dizeley [Ways to improve the efficiency of fine cleaning of engine oil by improving filter nonwovens in marine diesel oil cleaners] // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya : Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2018. № 4 S. 31–41.
5. Tichy J.A. A model of lubrication filtration // Trans. ASME, J. Lubric. Technol. 1981. Vol. 103. N 1. P. 81–89.
6. Pajatakes A.C., Tien C., Turian R.M. A new model for granular porous media: Model formulation // AIChE J. 1973. Vol. 19. P. 58–66.
7. Rajagopalan R., Tien C. Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model // AIChE J. 1976. Vol. 22, N 3. P. 523–533.
8. Spielman L.A., Fitzpatrick J.A., Theory for particle collection under London and gravity forces // J. Col. Sci. 1973. Vol. 42, N 3. P. 607–623.
9. Vorob'ev B.N., Nadezhkin A.V., Kicha G.P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhnykh gete-rogennykh sistem sudovykh ustroystv na osnove predstavleniy i apparata sluchaynykh markovskikh protsessov [Stochastic modeling of separation of complex heterogeneous systems of ship devices based on representations and apparatus of random Markov processes] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. № 3. T.2. S. 112–121.
10. Kicha G.P., Perminov B.N., Golenishchev A.V. Stokhasticheskaya yacheistaya model' ochistki goryuche-smazochnykh materialov DVS fil'trovaniem [Stochastic cellular model for cleaning fuel and lubricants with internal combustion engine filtration] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2009. № 1. S. 246–251.
11. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. M.: Nauka, 1977. 656 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Петрович Кича, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kicha@msun.ru.

Людмила Анатольевна Семенюк, аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: semenuk@msun.ru

Максим Игоревич Тарасов, аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru.

Gennadiy P. Kicha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of the Department of marine internal combustion engines; Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Verkhneportovaya. 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: kicha@msun.ru.

Liudmila A. Semeniuk, senior lecturer, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Verkhneportovaya. 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: semenuk@msun.ru.

Maxim I. Tarasov, senior lecturer, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoy, Verkhneportovaya. 50a, Vladivostok, 690003, Russian Federation, nadezkin@msun.ru.

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.077
УДК 621.43:629.113

Стенд для измерения крутящего момента маломощных энергоагрегатов

А.И. Самсонов¹, А.Н. Соболенко²

¹Дальневосточный Федеральный университет, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Предлагается тормоз с постоянными магнитами, при помощи которых можно исследовать маломощные высокоскоростные энергоагрегаты мощностью до 1 кВт. Принцип действия стенда основан на использовании силы торможения, вызванной вихревыми токами Фуко. Количество энергии, создаваемой токами Фуко и вызывающими силу торможения, прямо пропорционально квадрату частоты изменения магнитного поля. Нашем случае – это частота вращения диска тормоза. Приведена принципиальная схема устройства стенда с магнитным тормозом у которых ось вращения не совпадает с осью вращения вала турбомашин. Проанализирован принцип его действия. Объяснен его недостаток. Предложена новая схема стенда, у которого ось вращения совпадает с осью вращения вала турбомашин. Показано, что в этом случае возможно точное количественное определение величины крутящего момента испытываемого энергоагрегата. Предложенный стенд для измерения крутящего момента рекомендуется использовать для крутящего момента при испытаниях микротурбин, маломощных двигателей беспилотных летательных аппаратов, триммеров и газонокосилок, электромоторов небольшой мощности.

Ключевые слова: измерение, крутящий момент, микротурбина, двигатель малой мощности

Stand to measure torque moment of small scale power units

Anatoly I. Samsonov¹, Anatoly N. Sobolenko²

¹Far Eastern Federal University, ²Maritime State University named after G.I. Nevelskoi

Abstract. A brake with permanent magnets is proposed, with the help of which it is possible to study small-scale high-speed power units with a capacity of up to 1 kW. The principle of operation of the stand is based on the use of braking force caused by eddy currents Fouco. The amount of energy generated by Fouco currents and causing the braking force is directly proportional to the square of the frequency of the magnetic field. In our case, it is the speed of the brake disk. The schematic diagram of the device stand with a magnetic brake in which the axis of rotation does not coincide with the axis of rotation of the shaft of the turbomachine. The principle of its operation is analyzed. Explained by the lack of it. A new scheme of the stand, in which the axis of rotation coincides with the axis of rotation of the turbomachine shaft, is proposed. It is shown that in this case it is possible to accurately quantify the torque of the test power unit. The proposed stand for torque measurement is recommended for torque testing of microturbines, low-power engines of unmanned aerial vehicles, trimmers and lawn mowers, low-power electric motors.

Keywords: measurement, torque, microturbine, low power motor

Введение

Для снятия нагрузочных характеристик микротурбин применяют тормозные установки. Тормоз должен удовлетворять двум основным требованиям: обладать высокой чувствительностью и сохранять работоспособность при высоких частотах вращения, порядка $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ [1].

Широко применяемый на практике гидротормоз [2] в этом случае оказывается неработоспособным. Неудобным при высоких частотах вращения является и фрикционный тормоз. Для снятия нагрузочных характеристик микротурбин применяется электромагнитный тормоз, но он требует источник питания [3].

Самым простым и удобным в наших условиях является магнитный тормоз с применением постоянных магнитов.

Стенд с магнитным тормозом и с несоосным расположением тормоза и агрегата

Нами предлагается тормоз с постоянными магнитами, при помощи которых можно исследовать ручные высокоскоростные энергоагрегаты мощностью до 1 кВт.

Принцип действия стенда основан на использовании силы торможения, вызванной вихревыми токами Фуко. Эта сила появляется при

вращении проводника (диска) в постоянном магнитном поле (наведённым постоянным магнитом) [4]. Схема стенда с магнитным тормозом, применяемого для испытания турбомашин представлена на рис. 1.

Турбомашина закреплена в горизонтальном положении на станине 2 при помощи зажима 1 на стойке 3, установленной на фундаментной плите 4. На конце вала турбомашин посредством гайки 8, закреплён диск 7, вращающийся двумя постоянными магнитами 6, укрепленными на подвижной вилке 5. Для измерения частоты вращения на кронштейне 9 крепится датчик оборотов. Уравновешивающая сила создаётся грузами, устанавливаемыми на весы 10.

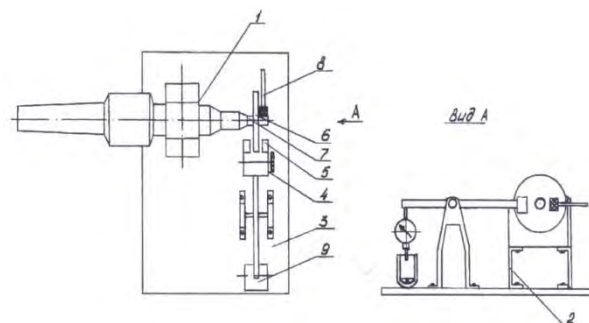


Рис. 1. Стенд с магнитным тормозом

Расчёт силы уравнивающей крутящий момент

Для нахождения крутящего момента рассмотрим систему сил, находящуюся в равновесии, рис. 2.

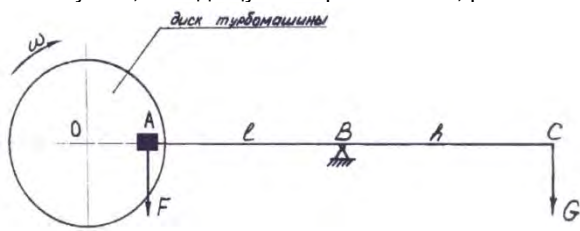


Рис. 2. Схема действия сил при определении крутящего момента турбины:

- l* – АВ расстояние от магнитов до оси вращения рычага;
- h* – расстояние от оси вращения рычага до уравнивающих грузов;
- F* – сила, наведённая токами Фуко;
- G* – уравнивающая сила;
- r* – ОА расстояние от оси вращения диска до силы *F*.

Так как рычаг может свободно колебаться вокруг оси вращения в точке *B*, то сила, возникающая от вихревых токов Фуко, будет стремиться отклонить рычаг от горизонтального положения.

Для того, чтобы рычаг оставался в горизонтальном положении, в точке *C* надо приложить силу *G*, определив её, можно найти силу *F*

$$F \cdot l = G \cdot h, \tag{1}$$

$$F = G \frac{h}{l}. \tag{2}$$

По известной формуле находим крутящий момент турбомашин, который создан силой *F*.

$$M_{кр} = F \cdot r, \tag{3}$$

отсюда находим *F*

$$F = \frac{M_{кр}}{r}. \tag{4}$$

Подставляя уравнение (4) в уравнение (2), получаем

$$\frac{M_{кр}}{r} = G \frac{h}{l}, \tag{5}$$

и тогда

$$M_{кр} = G \cdot h \frac{r}{l}. \tag{6}$$

Недостатком такого метода является то, что нам точно неизвестна точка приложения силы *F*, поэтому на этом стенде можно провести только качественные эксперименты: сравнение крутящих моментов у турбомашин с разными профилями рабочих лопаток турбины, различными сопловыми аппаратами и т.п.

Стенд с магнитным тормозом и соосным расположением тормоза и агрегата

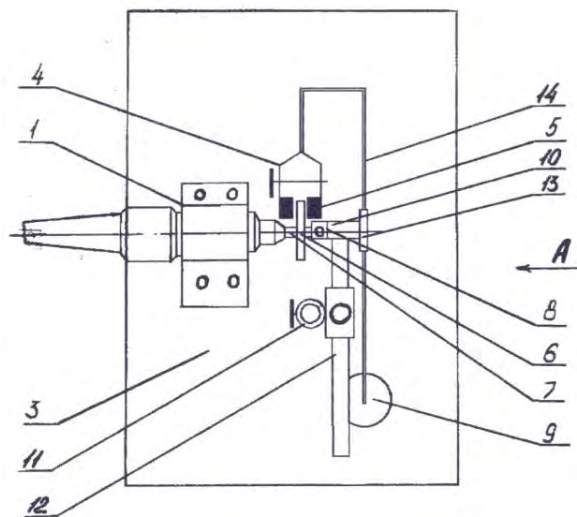
Для проведения количественных экспериментов стенд надо модернизировать таким образом, чтобы ось вращения рычага совпадала с осью вращения вала турбомашин. Тогда расстояние от места приложения силы *F* до оси вращения рычага и вала

турбомашин будут одним и тем же и формула (6) примет следующий вид

$$M_{кр} = Gh. \tag{7}$$

Это позволит точно определить крутящий момент турбомашин.

Схема модернизированного стенда показана на рис. 3.



Вид А

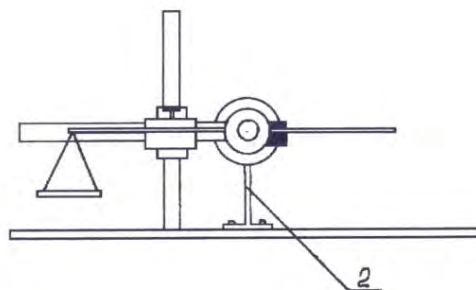


Рис. 3. Стенд, модернизированный с магнитным тормозом.

Турбина закреплена в горизонтальном положении на подвижной станине 1 при помощи зажима на стойке 2, установленной на фундаментной плите 3. Подвижное крепление станины обеспечивает продольное перемещение закреплённой турбомашин. Необходимость продольного перемещения возникает в связи с испытанием различных типов турбомашин. Алюминиевый диск 6 цангой 7 крепится к валу турбомашин. Хвостовик, расположенный с другой стороны диск, центрируется в узле крепления датчиков 10. Их центровка осуществляется с помощью втулки 11 и штанги 12. Штанга 12 имеет 4 степени свободы, что обеспечивает хорошую центровку.

Диск 6 вращается между двумя постоянными магнитами 5, укрепленными на подвижной вилке 4. Уравнивающая сила создаётся грузами, устанавливаемыми на весы 9. Подшипник весов 13

установлен соосно с узлом крепления датчиков. Это позволяет совместить ось вращения ротора турбомашин с осью качания рычага 14.

Частота вращения турбомашин определяется при помощи частотомера ЧЗ-34. Свет лампы постоянного тока напряжением 24 В через сверление в хвостовике диска 6, попадая на фотодиод, вызывает сигнал, который через преобразователь поступает на частотомер.

Целью испытаний является определение значения мощности турбомашин на равных частотах вращения и разном давлении рабочего воздуха. Для этого находится тормозной момент.

При вращении диска между полюсами постоянных магнитов, в нём возникают вихревые токи (токи Фуко). Согласно правилу Ленца магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующему эти вихревые токи [4]. В результате этого создаётся тормозная сила, которая передаётся на вилку, с укрепленными на ней магнитами, вызывая её отклонение. При помощи грузов, устанавливаемых на чашу весов, создаём уравновешивающую силу, которая приводит вилку с магнитами в

горизонтальное положение. В это же время по частотомеру измеряется частота вращения.

Смена частоты вращения достигается изменением тормозного момента. Это происходит при помощи регулировочного винта, при вращении которого изменяется расстояние между диском и постоянными магнитами, и тем самым изменяется напряжённость магнитного поля. Изменив расстояние – получаем новую тормозную силу, и с помощью грузов проводим уравновешивание сил, измеряя при этом новые значения массы груза и частоты вращения.

Вычислив момент по формуле (7) мы можем найти значение эффективной мощности

$$N = M_{кр}\omega. \quad (8)$$

где ω – угловая скорость машины.

Заключение

Предложенный стенд для измерения крутящего момента рекомендуется использовать для крутящего момента при испытаниях микротурбин, маломощных двигателей беспилотных летательных аппаратов, триммеров и газонокосилок, электромоторов небольшой мощности.

Литература

1. Самсонов А.И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин: монография. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2009, 292 с.
2. Дизели. Справочник / Под ред. В.А. Ваншейдта и др. Л.: Машиностроение, 1977. 488 с.
3. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. М.: Высшая школа. 1975. 320 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. Для инженеров и студентов ВУЗов. Изд-е 7-е. М.: Наука. 1979. 943 с.

References

1. Samsonov A.I. Podshipniki s gazovoj smazkoj dlya turbomashin: monografiya. Vladivostok: Izd-vo DVFU, 2009, 292 s. [Samsonov A. I. Bearings with gas lubrication for turbomachines: monograph. Vladivostok: publishing house of Far Eastern Federal University, 2009, 292 p.]
2. Diesels. The directory / Under the editorship of V. A. Vansada etc., Leningrad: Mashinostroenie, 1977. 488 PP. [Diesels. The directory / Under the editorship of V. A. Vansada etc., Leningrad: Mashinostroenie, 1977. 488 PP.]
3. Raikov I. Ya. Tests of internal combustion engines. Moscow: Higher school. 1975. 320 PP. 4. Yavorsky B. M., Detlaf A. A. Handbook of physics. For engineers and University students. Ed. 7-E. M.: Science. 1979. 943 PP.] Dizeli. Spravochnik / Pod red. V.A. Vanshejdta i dr. L.: Mashinostroenie, 1977. 488 s.
3. Rajkov I.YA. Ispytaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya. M.: Vysshaya shkola. 1975. 320 s. [Raikov I. Ya. Tests of internal combustion engines. Moscow: Higher school. 1975. 320 PP.]
4. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. Dlya inzhenerov i studentov VUZov. Izd-e 7-e. M.: Nauka. 1979. 943 s. [Yavorsky B. M., Detlaf A. A. Handbook of physics. For engineers and University students. Ed. 7-E. M.: Science. 1979. 943 PP.]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Иванович Самсонов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой энергетики и автоматики, Дальневосточный Федеральный университет 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: aicam@mail.ru

Anatoly I. Samsonov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of Ship energetic and automatics department, Far Eastern Federal University, Sukhanova 8, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: aicam@mail.ru

Анатолий Николаевич Соболенко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые двигатели внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: sobolenko_a@mail.ru, тел.: 8(950)286-57-03

Anatoly N. Sobolenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of department of ship power installations, Maritime State University named after G.I. Nevelskoi, 690059, Vladivostok, Verhneportovay str. 50a, Russian Federation, e-mail: sobolenko_a@mail.ru, тел.: 8(950)286-57-03

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.078

УДК 621.43.013 – 629.3

Эффективность применения регенерированного моторного масла легированного присадками в судовых дизелях разной форсировки

В.В. Тарасов¹, А.Н. Соболенко¹, М.И. Тарасов¹¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского

Аннотация. Данная статья посвящена изучению эксплуатационных свойств регенерированных моторных масел (РММ) с точки зрения влияния на износ узлов трения магистрального дизеля при его работе на судовом топливе разного качества. Целью исследования было построение обобщенной модели износа судовых дизельных деталей на основе экспериментальных исследований. Для экспериментов использовался дизель 2Ч10,5 / 13. Износ определялся методом искусственных баз и взвешиванием. Описание обобщенной модели износа деталей испытываемого дизеля осуществлялось полиномом второго порядка. Для получения модели был выбран непозиционный план для трех переменных испытаний: концентрация присадок в масле, коэффициент качества топлива и уровень форсирования дизельного топлива.

Получена обобщенная модель износа дизеля в виде полинома второго порядка. Доверительные интервалы коэффициентов регрессии определялись по критерию Стьюдента. Проверка адекватности модели, выполненная по критерию Фишера, показала, что модель адекватна на уровне значимости 5%. Показана возможность использования полученной модели для оценки величины износа при различных значениях параметрических факторов.

Ключевые слова: некомпозиционный план, модель изнашивания, концентрация присадок, качество топлива, уровень форсирования дизеля.

Efficiency of the application of regenerated motor oil alloying with additives in ship diesels of different forcing

Valery V. Tarasov¹, Anatoly N. Sobolenko¹, Maxim I. Tarasov¹¹Maritime university named after G.I. Nevelskoi

Abstract. This article is devoted to the study of the operational properties of regenerated engine oils (REO) in terms of the impact on the wear of friction units of the trunk diesel engine when it works on different quality marine fuel. The aim of the study was to build a generalized model of wear of marine diesel parts on the basis of experimental studies. For experiments was used diesel 2Ч10,5/13. Wear was determined by the method of artificial bases and weighting. The description of the generalized model of wear of details of the tested diesel engine was carried out by a polynomial of the second order. To obtain the model, a non-position plan was chosen for three test variables: the concentration of additives in the oil, the fuel quality factor and the level of diesel forcing.

A generalized model of diesel wear in the form of a second-order polynomial is obtained. Confidence intervals of regression coefficients were determined by student's criterion. Checking the adequacy of the model performed by Fisher's criterion showed that the model is adequate at 5% significance level. The possibility of using the obtained model to estimate the wear value at different values of parametric factors is shown.

Keywords: non-composite plan, the model wears, the concentration of additives, fuel quality, level forcing of diesel.

Введение

Повышение энергоресурсосбережения при эксплуатации судовых дизелей путем повторного использования отработанных моторных масел (ОММ) разных эксплуатационных групп, после их регенерации и восстановлении базовых эксплуатационных свойств моторной группы, является важной составной частью решения проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на морском транспорте и снижения антропогенного экологического давления на окружающую среду [1, 8, 9]. Большой интерес представляет исследование влияния качества применяемого судового топлива и уровня форсирования дизеля по мощности на процесс старения регенерированного моторного масла (РММ) и износные свойства трибосопряжений дизеля [2, 3, 4].

Данная статья посвящена исследованию эксплуатационных свойств РММ в аспекте влияния на износ трибузлов тронкового дизеля при его работе на разном по качеству судовом топливе, что является определяющим фактором старения

применяемого масла и степенью легирования его присадками перед использованием [5, 6].

Методика проведения исследований и постановка задачи оценки эксплуатационных свойств РММ индикацией износа

Оценку износных свойств регенерированного масла М-10-В₂(р) осуществляли на дизеле 2Ч10,5/13 по ОСТ24.060.09-99 на номинальной мощности ($P_e = 14,7$ кВт, $n = 25$ с⁻¹) этапами по 100 ч. Замер скорости изнашивания *И* контролируемых деталей моторной установки осуществляли взвешиванием по потере их массы за этап испытаний методом искусственных баз (прибор УПОИ-6). Оценку *И* осуществляли относительно скорости изнашивания втулок цилиндра, поршневых колец, вкладышей подшипников и мотылевых шеек коленчатого вала. Для увеличения скорости изнашивания деталей дизеля полнопоточный фильтр тонкой очистки был замещен ФГО [3, 5, 6].

Описание обобщенной модели изнашивания ДВС осуществлено полиномом второго порядка. Для получения модели выбран некомпозиционный план, который при трех переменных факторах

рациональнее центральных композиционных. Разработанный план ротатабелен и по числу опытов более экономичен, чем центральный композиционный план [5, 7]. Для испытаний были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов представленных в таблице 7.2, процедура представлена в работе [5, раздел 7, табл. 7.2/7.3, стр.192/194]

Экспериментально-статистическое моделирование износа трибосопряжений дизеля при использовании РММ

Для нахождения зависимости износа трибозулов дизеля $I(c_n, K_T, p_{me})$ построен план, матрица которого (таблица 7.3) предусматривает проведение 15 опытов [5, 6]. Предложенный план представляет собой определенную выборку строк из полного факторного эксперимента типа 3^k . Некомпозиционный план характеризуется наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей, в результате чего упрощается вычисление коэффициентов модели [6].

Модель процесса изнашивания при предоставлении факторов в натуральном выражении имеет вид [6]:

$$I = -101,41 - 1,76c_n + 81,44K_T + 119,6p_{me} - 11,25c_nK_T - 3,37c_n p_{me} + 34,25p_{me}K_T + 0,63 c_n^2 + 132,03 K_T \quad (1)$$

Анализ зависимостей (1) показывает, что наибольшее влияние на I оказывает фактор K_T . Действие c_n на изнашивание дизеля в наибольшей мере проявляется при взаимодействии с фактором K_T . Причем, если взаимодействие факторов K_T и p_{me} увеличивает I , то совместное влияние c_n и K_T проявляется в его снижении.

Эффект взаимодействия факторов c_n и K_T выражен сильно, а совместное действие c_n или K_T с p_{me} и проявляется слабо.

Полученная математическая модель рекомендована для расчетов и анализа эффективности применения РММ в дизелях разной форсировки, различного уровня легирования специальными присадками и применяемого на водном транспорте судового топлива [2, 3 – 6].

Исследование влияния судовых топлив на износ дизеля при его работе на РММ с добавленными присадками

Анализ основных видов судовых топлив

По основным показателям применяемые на судах топлива в зависимости от показателя качества K_T разбиты на 4 группы [3,5,6]:

– первая, со значениями $K_T = 0,2–0,5$ – это дистиллятные топлива Л, З, ЗС, А и УФС (ГОСТ 305-2010) с содержанием серы от 0,2 до 0,5 %. В зарубежных аналогах - топливах DM, DMA и DMB (ISO 8217-96) содержание серы находится в диапазоне 0,5–1 %, но может достигать до 1,5 %.

– ко второй группе с $K_T = 0,6–0,9$ относятся моторное топливо ДТ (1667-2010), флотские мазуты Ф-5 и Ф-12 (ГОСТ 10585-99) и экспортные топлива Э-2 и Э-3 (ТУ 38.001361-97). Содержание серы в них 0,5–2 %. Из зарубежных топлив сюда можно включить судовые топлива DMC, RMA, RMB, RMC с высоким содержанием серы превышающим 2 %. Их

характеристики соответствуют международному стандарту MS ISO/DIS-F-8217.

– третья группа ($K_T = 1 – 1,3$) представлена судовым высоковязким топливом СВЛ (ТУ 38.1011314-90). Оно содержит серы 1 – 2,5 %. В этой группе отечественное экспортное топливо

Э-4 (ТУ 38.001211-97) и зарубежный высоковязкий мазут RDM (ISO BS 8217-96). Зарубежные топлива характеризуются повышенным содержанием серы, которое может достигать до 3,5 %.

– к четвертой группе ($K_T = 1,4–1,8$) относят топлива с вязкостью 80–180 сСт при 50 °С. Это моторное ДМ (ГОСТ 1667-2010), высоковязкое СВТ (ТУ 38.1011314-90), экспортное топливо Э-5 (ТУ 38.001361-92) и топочный мазут М-40В (ГОСТ 10585-99). Изготавливают их из остатков переработки нефти и для снижения температуры застывания в добавляют среднестиллятные фракции. Сера присутствует 2 – 3 %. Зарубежными аналогами этой группы считают топлива RME и RMF (ISO BF-96) с содержанием серы 3,5 – 4 %.

Исследование эффективности РММ в дизелях по регрессионной модели (1) при граничных значениях уровня форсировки ДВС

Возможности регрессионной модели (1) иллюстрированы в интерпретации графического редактора программного комплекса MachCad 15 на рисунках 1, 2, 3 и 4 для $p_{me} = 0,5, 1,0$ и $1,5$ МПа [7].

Математическая модель (1) при факторах форсировки, взятых на нулевом уровне, нижнем и верхнем, соответственно ($p_{me} = 1,0, 0,5$ и $1,5$ МПа) имеют вид для эффективности применения РММ:

$$I = +18,19 - 5,13c_n + 115,69K_T - 11,25c_nK_T + 0,63 c_n^2 + 132,03 K_T \quad (2)$$

$$I = +18,552 - 3,445c_n + 98,565K_T - 11,25c_nK_T + 0,63 c_n^2 + 132,03 K_T^2 \quad (3)$$

$$I = 77,99 - 6,815c_n + 132,815K_T - 11,25c_nK_T + 0,63 c_n^2 + 132,03K_T^2 \quad (4)$$

Интерпретация полученных регрессионных моделей (2, 3 и 4) изнашивания трибосопряжений ДВС в натуральных значениях при указанных уровнях фактора форсировки ДВС с визуализацией двумерных линий одного уровня износа, приведена на рис. 1, 2 и 3.

Ресурсы программного комплекса MathCAD 15 позволяют произвести наложение поверхностей отклика износа трибосопряжений ДВС характеризующих эффективность РММ применяемого в дизелях с разным уровнем форсирования мощности (рис. 1, рис. 2 и рис. 3). Совмещенные поверхности отклика, характеризующие процесс изнашивания поверхностей трибосопряжений ДВС разной форсировки представлены на рис. 4 (обозначены как поверхность - 1, как поверхность - 2 и как поверхность - 3).

Таким образом, комплексная регрессионная модель оценки эффективности регенерированного моторного масла с восстановленными легирующими присадками эксплуатационными свойствами представляет математическую модель на основании экспериментально-статистических данных [2, 3-6]. С ее помощью можно определить необходимое

количество вводимых присадок с учетом качества применяемого моторного топлива и уровня

мощностных характеристик ДВС характеризуемым степенью форсировки.

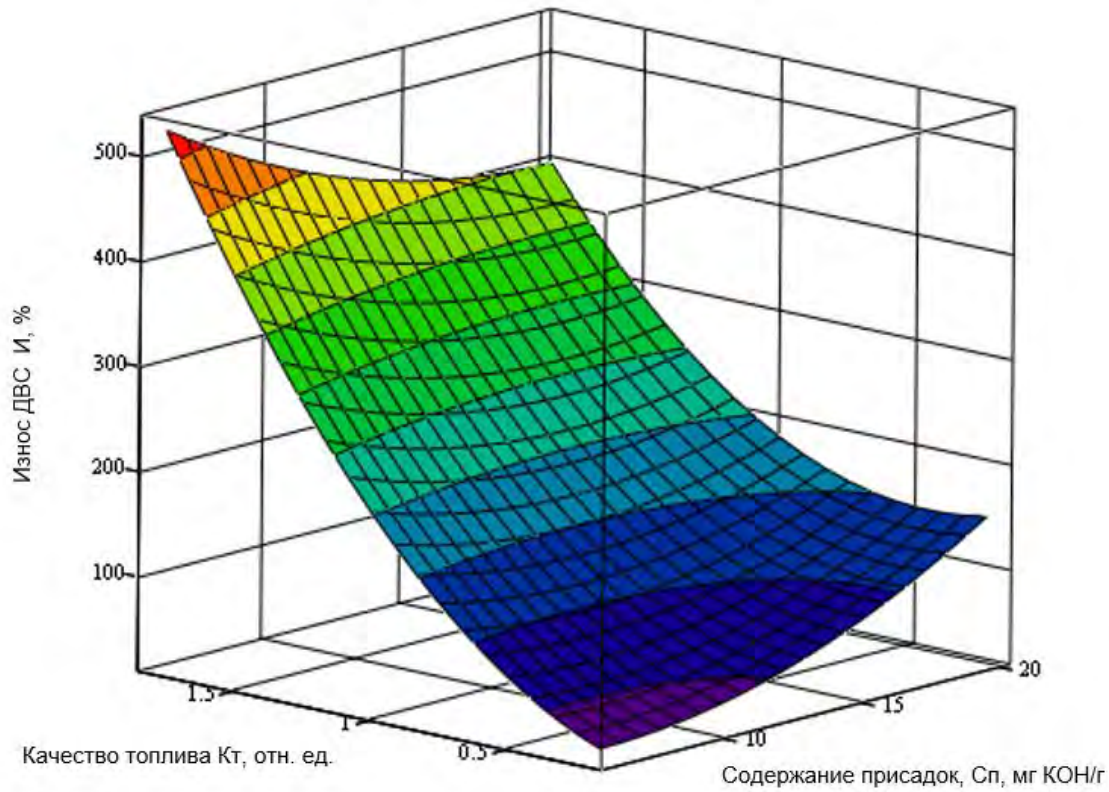


Рис. 1. Гиперповерхность отклика функции износа ДВС с визуализацией его параметров при факторе - форсировка дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа в зависимости от содержания присадок и качества применяемого топлива при испытаниях РММ

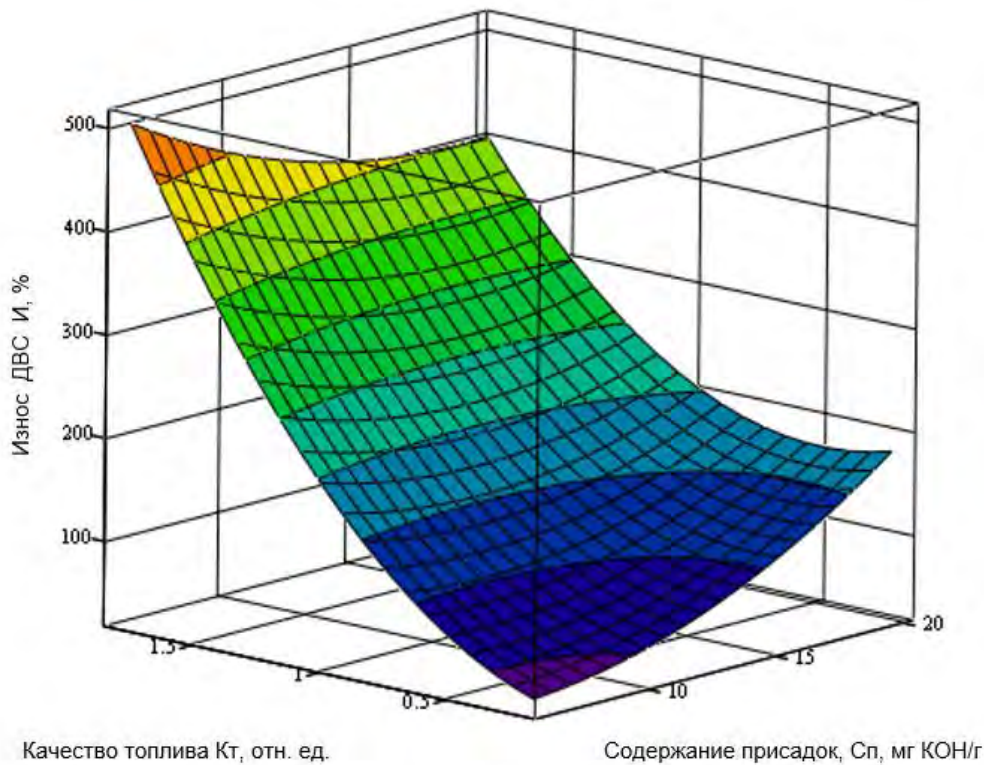


Рис. 2 – Гиперповерхность отклика функции износа ДВС с визуализацией его параметров при факторе - форсировка дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа в зависимости от содержания присадок и качества применяемого топлива при испытаниях РММ

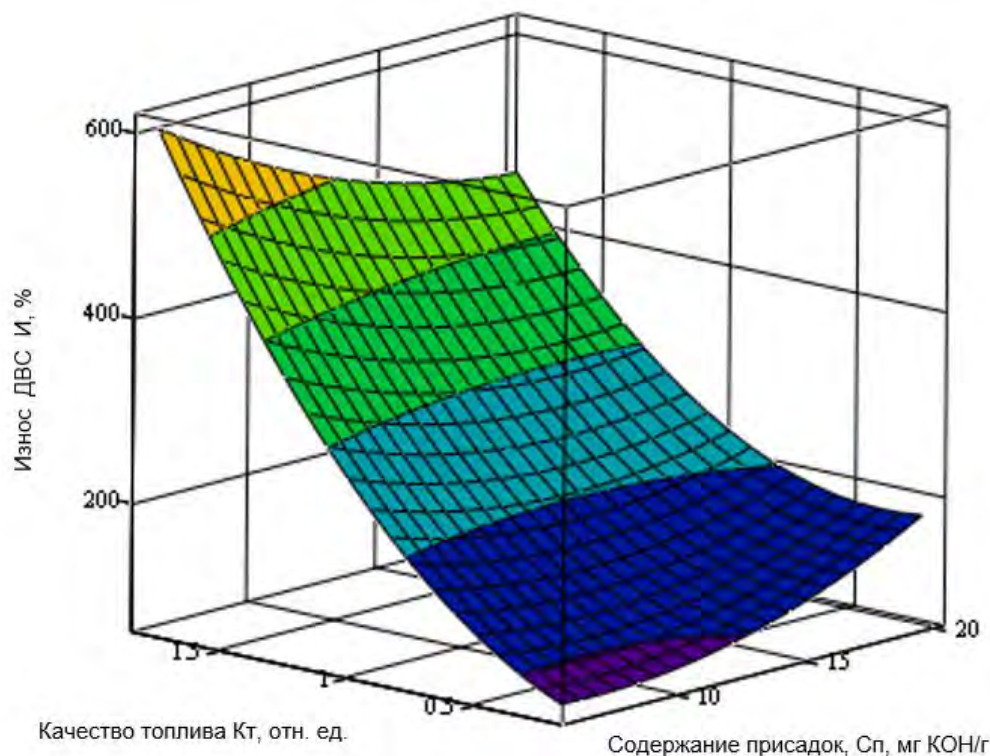


Рис. 3. Гиперповерхность отклика функции износа ДВС с визуализацией его параметров при факторе - форсировка дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа в зависимости от содержания присадок и качества применяемого топлива при испытаниях РММ

Двумерное сечение поверхностей отклика [7] эффективности РММ в дизелях разной форсировки (рис.1, рис.2 и рис.3) дает визуальное представление изнашивания трибосопряжений ДВС от уровня легирования РММ присадками с учетом применяемых топлив для судовых дизелей и позволяет оценить возможности РММ в эксплуатации СЭУ [2, 3, 5]. Совмещение гиперповерхностей целевой функции И отклика при оценке влияния на изнашивание дизеля его форсировки, качества РММ (легирование присадками) и применяемого топлива при дает визуальное представление о процессах эксплуатации ДВС с использованием РММ.

Таким образом, комплексная регрессионная модель оценки эффективности регенерированного моторного масла с восстановленными легированием присадками эксплуатационными свойствами представляет математическую модель на основании экспериментально-статистических данных [2, 3-6]. С ее помощью можно определить необходимое количество вводимых присадок с учетом качества применяемого моторного топлива и уровня мощностных характеристик ДВС характеризуемым степенью форсировки.

Двумерное сечение поверхностей отклика [7] эффективности РММ в дизелях разной форсировки (рис.1, рис.2 и рис.3) дает визуальное представление изнашивания трибосопряжений ДВС от уровня легирования РММ присадками с учетом применяемых топлив для судовых дизелей и позволяет оценить возможности РММ в эксплуатации СЭУ [2, 3, 5]. Совмещение

гиперповерхностей целевой функции И отклика при оценке влияния на изнашивание дизеля его форсировки, качества РММ (легирование присадками) и применяемого топлива при дает визуальное представление о процессах эксплуатации ДВС с использованием РММ.

Анализ численных расчетов по представленным моделям и экспериментальные данные в графической форме

Анализ зависимостей 1, 2, 3 и 4 позволяет сделать вывод, что при увеличении концентрации присадок из-за повышения зольности масел при работе на дистиллятных и моторных топливах возможна интенсификация изнашивания деталей ЦПГ дизеля (рис.5). Этот факт подтверждается не только проведенным моделированием, но и результатами длительных судовых испытаний [2, 3-6].

Увеличение концентрации присадок в масле и, следовательно, улучшение его эксплуатационных свойств благоприятно сказывается на износе дизеля только до определенного значения c_n .

Численные расчеты по указанным моделям при значениях представленных факторов $I(c_n, K_t, p_{me})$ на основном уровне позволяют иллюстрировать зависимости И – изнашивание трибоузлов от K_t и p_{me} . Сопоставление результатов судового эксперимента и расчетов по регрессионным моделям 1, 2 и 3 представлено в графической интерпретации на рисунке 6.

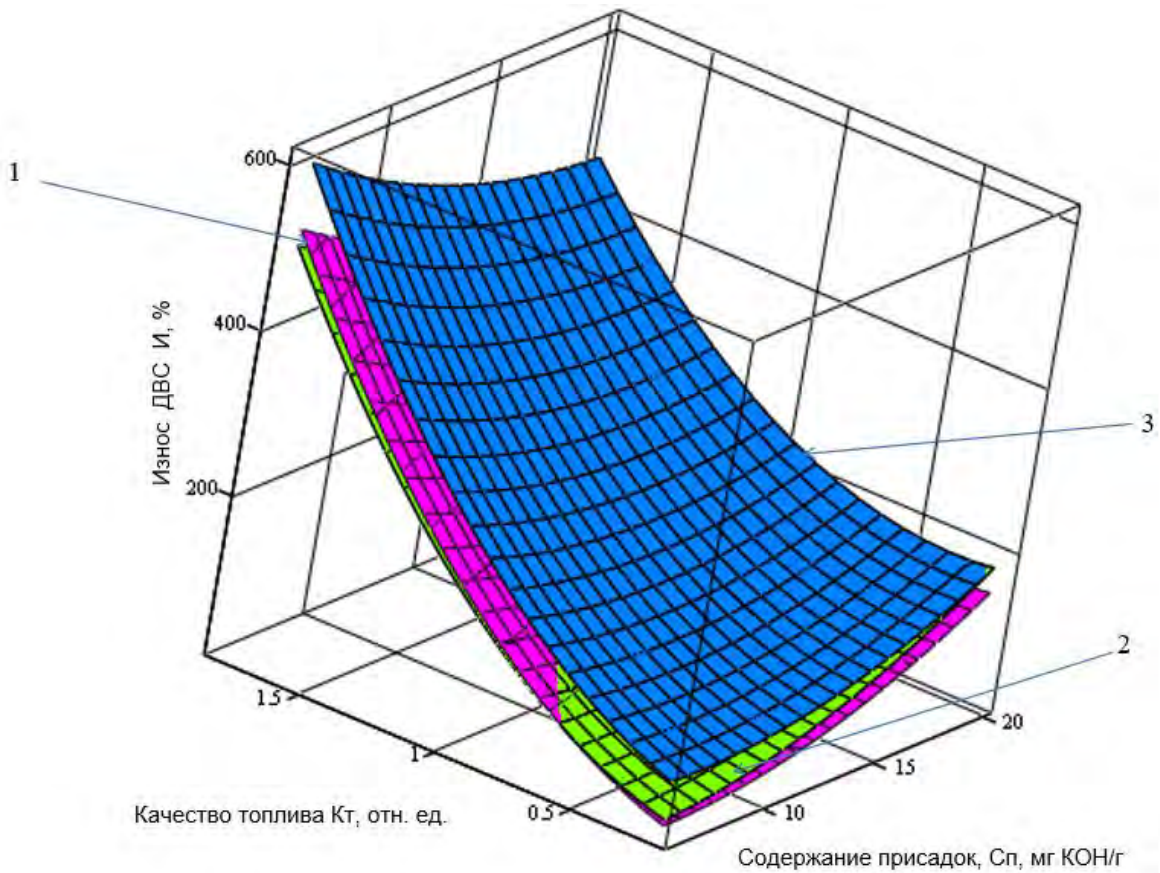


Рис. 4. Наложение гиперповерхностей отклика функций износа ДВС при факторах: - форсировка дизеля на нулевом уровне $p_{me} = 1,0$ МПа; форсировка дизеля на нижнем уровне $p_{me} = 0,5$ МПа и форсировка дизеля на верхнем уровне $p_{me} = 1,5$ МПа с визуализацией ее влияния на параметры износа ДВС в зависимости от содержания присадок и качества применяемого топлива при испытаниях РММ:

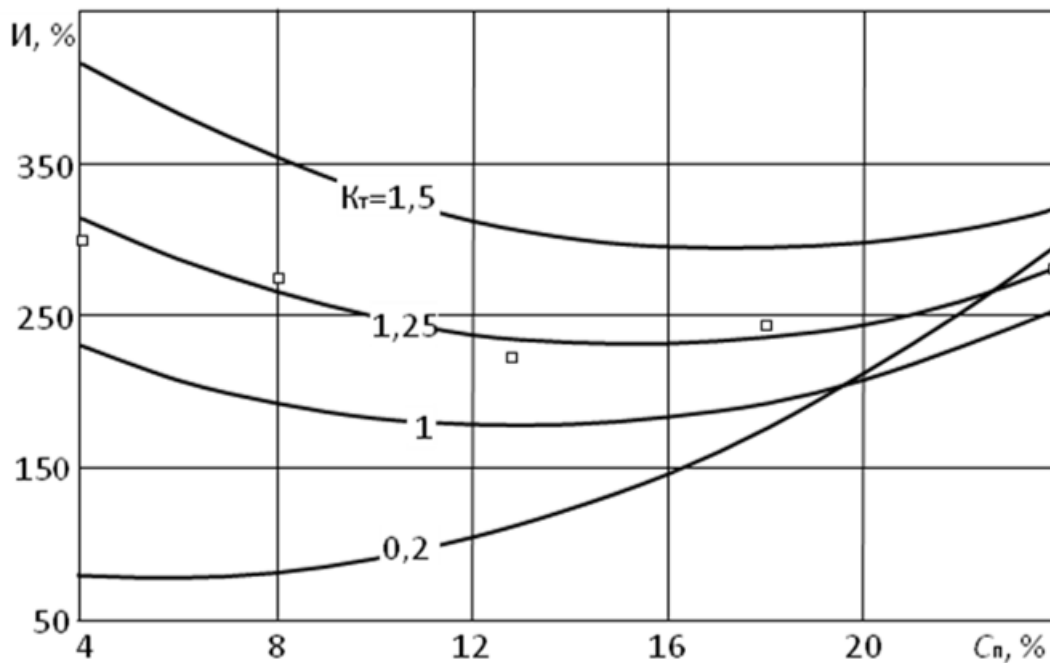


Рис. 5 Зависимость износа дизеля от концентрации присадок в РММ и качества применяемого топлива, / □ – судовой эксперимент

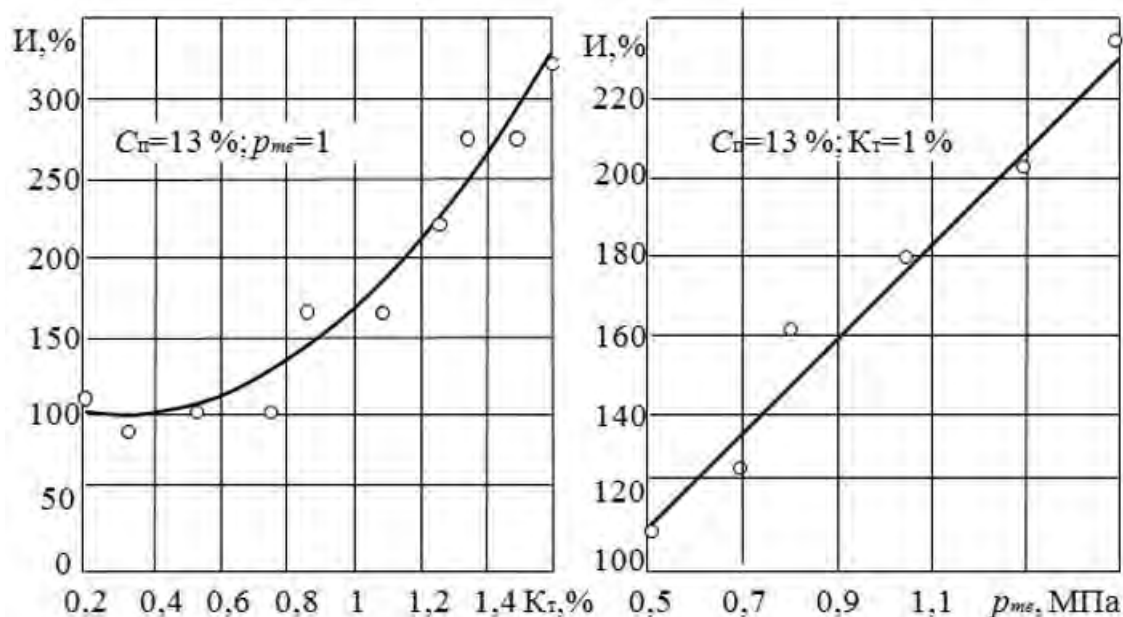


Рис. 6. Зависимости изнашивания трибосопряжений от качества применяемого топлива и уровня форсировки дизеля, о – судовой эксперимент

При высоких концентрациях присадок, особенно при работе на качественных топливах, с повышением c_n наблюдается рост И. И чем дефорсированнее дизель, тем резче выражена такая тенденция (см. рисунок 5 и 6). Это явление можно объяснить тем, что при низких p_{me} и содержании серы в топливе, особенно при повышенном маслообмене в связи с высоким угаром РММ, зольность работающего циркуляционного регенерированного масла стабилизируется на высоком уровне, вызывая интенсификацию изнашивания поршневых колец и цилиндрических втулок.

Заключение

Определено, что применение РММ возможно в судовых дизелях разной форсировки при условии легирования присадками до уровня свежих товарных масел для восстановления их добраковочных, эксплуатационных показателей моторного масла.

1. Анализ полученных зависимостей показал что чем хуже топливо и больше форсировка дизеля, тем выше должно быть c_n и следовательно запас эксплуатационных свойств регенерированного моторного масла. Полученная модель изнашивания дизеля на регенерированном моторном масле

адекватна для машин с уровнем форсировки 0,5 – 1,5 МПа и широким спектром качества применяемого топлива.

2. Установлено, что при экспериментально-статистическом моделировании эффективности РММ при их применении в ДВС разного уровня форсирования мощности, определяющими факторами являются содержание присадок и качественные показатели применяемого судового топлива.

3. Предложены уравнения для численного расчета необходимого количества вводимых присадок с учетом качества судового топлива рекомендованного для данного типа дизеля.

4. Для наиболее целостного исследования причин влияющих на эффективность РММ требуются более глубокие исследования процессов безопасной эксплуатации судовых дизелей с использованием большего числа факторов характеризующих регенерацию отработанных моторных масел на основе экспериментально-статистического моделирования в лабораторных и эксплуатационных условиях

Литература

1. Тарасов, В.В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В. В. Тарасов // Сб. науч. тр. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010». – Одесса: Транспорт, 2010. – Т. 1. – С. 65 – 71.
2. Тарасов, В.В., Соболенко А.Н. Рекомендации по глубине очистки от механических примесей регенерированных моторных масел разных эксплуатационных групп // Санкт-Петербург, научный журнал Морские интеллектуальные технологии №4 (42) Т. 5, 2018. – С. 110-113.
3. Кича, Г.П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 1, 2. – С. 83–91.

4. Тарасов, В.В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / Тарасов В.В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3, 4. – С. 99–108.
5. Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин // – Владивосток: Мор. гос. ун-т, – 2011. – 372 с.
6. Кича, Г.П. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивания основных деталей ДВС / Г.П. Кича, А.В. Надежкин, Б.Н. Перминов // Транспортное дело России. – 2004. – № 2. – С. 51–53.
7. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М. : Машиностроение, 1981. 184 с.
8. Пиковская, Е.В., Сурин С.А. Регенерация отработанных масел в США/Мир нефтепродуктов. 2000. № 4. – С. 23–25.
9. Юзефович, В.И. Организация сбора отработанных смазочных масел//Мир нефтепродуктов. 2001. № 3. – С. 28–30.

References

1. Tarasov, V. V. Problemy utilizatsii i regeneratsii otrabotannykh smazochnykh materialov na sudah: puti ih resheniya vosstanovleniem motornykh svoystv i povtornym ispol'zovaniem v sudovykh dizelyah [Problems of recycling and regeneration of used lube oil on ships: their solutions restoration of motor properties and re-use in marine diesel engines] / V.V. Tarasov // Proc. scientific. Tr. Conf. "Modern directions of theoretical and applied research 2010". - Odessa: Transport, 2010. - Vol. 1. - P. 65-71.
2. Tarasov, V. V., Sobolenko A. N. Rekomendatsii po glubine oчитки ot mekhanicheskikh primesej regeneriro-vannykh motornykh masel raznykh ekspluatatsionnykh grupp [Recommendations on the depth of purification from mechanical impurities of regenerated motor oils of different operating groups] // St. Petersburg, scientific journal of Marine intelligent technologies №4 (42) Vol. 5, 2018. - P. 110-113.
3. Kicha, G. P. Effektivnost' primeneniya v sudovykh dizelyah regenerirovannykh vosstanovlennykh otrabotannykh motornykh masel [Efficiency of application in marine diesel engines the regeneration and recovered used motor oil] / G. P. Kicha, V. V. Tarasov, E. M. Derevtsov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №1, 2. - P. 83-91.
4. Tarasov, V. V. Obosnovanie glubiny oчитки otrabotannykh motornykh masel ot mekhanicheskikh primesej pri ih regeneratsii i povtornom ispol'zovanii v SEU [Justification of the purification of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and re-used in SEU] / V. V. Tarasov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №3, 4. - P. 99-108.
5. Kicha, G. P. Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovykh dizelyah [Sustainable oil used in marine diesel engines] / G. P. Kicha, B.N. Perminov, A. V. Nadezhkin // Vladivostok: Mor. state un-ta, 2011. - 372 p.
6. Kicha, G. P. Imitatsionnoe modelirovanie smazki tribosopryazhenij i iznashivaniya osnovnykh detalej DVS [Simulation of the lubrication of triborate stresses and wear of the main parts of internal combustion engines] / G. P. Keech, A. V. Nadezhkin, B. N. Perminov // Transport case of Russia. – 2004. – No. 2. - P. 51-53.
7. Spiridonov, A. A. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov [Design of experiments in the study of technological processes] / A. A. Spiridonov. - M.: Engineering, 1981. - 184 p.
8. Pikovskaya, E. V., Surin S. A. Regeneratsiya otrabotannykh masel v SSHA [Regeneration of waste oils in the USA] //World of petroleum products. 2000. No. 4. - P. 23-25.
9. Yuzefovich, V. I. Organizatsiya sbora otrabotannykh smazochnykh masel [Organization of collection of used lubricating oils] //World of petroleum products. 2001. No. 3. - P.28-30.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тарасов Валерий Васильевич, профессор «МГУ им. адм. Г.И. Невельского», профессор кафедры безопасности в нефтегазовом комплексе Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail:vtarasov@msun.ru, тел.: 8(902)064-11-64

Соболенко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые двигатели внутреннего сгорания Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail:sobolenko_a@mail.ru, тел.: 8(950)286-57-03

Тарасов Максим Игоревич, аспирант, аспирант кафедры судовые двигатели внутреннего сгорания Морской государственной университет им. Адм. Г.И. Невельского 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru

Valery V. Tarasov, professor of Maritime university named after G. I. Nevelskoi the professor of department safety in the oil and gas sector Maritime State University, 690059, Vladivostok, Verhneportovay str. 50a, Russian Federation e-mail:vtarasov@msun.ru, тел.: 8(902)064-11-64

Anatoly N. Sobolenko, Dr. Sci. (Eng.), professor, professor of department of ship's internal combustion engines Maritime State University, 690059, Vladivostok, Verhneportovay str. 50a, Russian Federation, e-mail: sobolenko_a@mail.ru, тел.: 8(950)286-57-03

Maxim I. Tarasov, Postgraduate, postgraduate of department of ship's internal combustion engines Maritime State University, 690059, Vladivostok, Verhneportovay str. 50a, Russia e-mail: nadezkin@msun.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.079

УДК 621.43.013:629.3

Расчет параметров регенерации самоочищающихся фильтров смазочных систем судовых дизелей

Г.П. Кича¹, А.В. Надежкин¹, С.П. Бойко¹¹Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Обоснована актуальность исследований рабочих процессов самоочищающегося фильтра, предназначенного для очистки моторного масла в двигателях внутреннего сгорания. Приведена методика расчета параметров регенерации автоматизированных фильтров, сформированных на базе модулей СРФ-60 и СРФД-120, позволяющая осуществлять выбор гидродинамического режима и времени обратной промывки фильтрующих элементов с учетом условий функционирования маслоочистителей. Выделено влияние на эффективность регенерации фильтровального процесса, идентифицированного удельной интенсивностью удаления дисперсной фазы из масла, гидродинамики (числа Рейнольдса) и относительного времени обратной промывки, адгезионных свойств отложений, особенностей конструкции фильтра, дисперсности загрязнений. Представлены доказательства адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей, полученных по результатам лабораторных испытаний модели фильтра, и соответствия их данным эксплуатационных натурных испытаний самоочищающихся фильтров на судах. Показана возможность расчета и корректировки срока автономной работы самоочищающегося фильтра в смазочных системах судовых дизелей с учетом форсирования дизеля, качества применяемых горюче-смазочных материалов, интенсивности старения масла, срабатывания входящих в него присадок и уровня загрязнения крупнозернистыми механическими примесями. Дано заключение, что комбинированная очистка масла в двигателях внутреннего сгорания с использованием байпасной схемы сепарирования и центрифугирования облегчает функционирование полнопоточно подключаемых в систему смазки автоматизированных фильтров и позволяет увеличить срок автономной работы их до 5 тыс. ч. При этом надежная и эффективная работа очистителей возможна в самых жестких условиях загрязнения и старения масла.

Ключевые слова: саморегенерирующийся фильтр, система смазки дизеля, судовой дизель, очистка масла, регенерация фильтра, рабочие процессы фильтра.

The calculation regeneration parameters of self-cleaning filters for lubricant systems of ship diesels

Gennadiy P. Kicha¹, Andrey V. Nadezkin¹, Sergey P. Boiko¹¹Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy

Abstract The relevance of research on the working processes of a self-cleaning filter intended for cleaning engine oil in internal combustion engines is substantiated. A methodology for calculating the regeneration parameters of automated filters generated by the SRF-60 and SRFD-120 modules is presented. The influence on the efficiency of the regeneration of the filtering process, which is identified by the specific intensity of the removal of the dispersed phase from the oil, the hydrodynamics (Reynolds number) and the relative backwash time, the adhesive properties of the sediments, the design features of the filter, and the dispersion of contaminants are highlighted. The evidence of the adequacy of the calculated experimental dependencies obtained from laboratory tests of the filter model and their compliance with the data of field tests of self-cleaning filters on ships is presented. The possibility of calculating and adjusting the autonomous work of the self-cleaning filter in the lubrication systems of marine diesel engines is shown taking into account the forcing of the diesel engine, the quality of the fuels and lubricants used, the aging rate of the oil, the operation of its additives and the level of contamination with coarse-grained mechanical admixture. It is concluded that the combined cleaning of oil in internal combustion engines using a bypass separation and centrifugation scheme facilitates the functioning of fully automated filters in the lubrication system and allows them to increase their battery life up to five thousand hours. Reliable and efficient operation of the purifiers is possible in the harshest conditions of oil pollution and aging.

Keywords: self-regenerating filter, diesel lubrication system, marine diesel engine, oil refining, filter regeneration, filter working processes.

Введение

В последние годы самоочищающиеся (саморегенерирующиеся) фильтры (СРФ) получили широкое распространение для полнопоточной тонкой очистки моторного масла (ММ) в судовых дизелях [1–3]. Имея довольно высокую тонкость отсева (30–50 мкм), они надежно защищают пары трения, в первую очередь рамовые и мотылевые подшипники, двигателя от абразивного изнашивания. СРФ предотвращает наволакивание металлопродуктов изнашивания на поверхности трения и таким образом создает предпосылки для

предотвращения проворачивания тонкостенных вкладышей подшипников двигателя [2].

Рабочие процессы СРФ, особенно регенерация, слабо изучены [3]. В настоящее время нет рекомендаций по выбору скорости промывочного потока и времени регенерации, чтобы СРФ надежно функционировали в течение срока необслуживаемой работы с достижением требуемой автономности.

При подборе СРФ в систему смазки (СС) конкретного дизеля необходимо задавать режимы работы этого маслоочистителя (МО) для обеспечения эффективного функционирования с длительным сроком автономной работы. Процесс

фильтрации характеризуется величиной потока масла, подлежащего очистке, толщиной и полнотой отсева его от нерастворимых загрязнений. Схема расчета этих показателей известна [4].

Методики расчета показателей СРФ с позиции задания режима регенерации не существует. Параметры регенерации задаются без должного обоснования, поэтому довольно часты случаи нарушения в работе фильтра, когда автоматизированная промывка фильтрующих элементов (ФЭ) не восстанавливает функциональные характеристики МО для эффективного функционирования в режиме фильтрации [5]. Фильтрующие элементы интенсивно «забиваются» отложениями и СРФ переходит в частичнопоточный режим работы, пропуская в пары трения дизеля крупные абразивные частицы загрязнений, способных вызывать задиры в трибосопряжениях.

Режим обратной промывки ФЭ фильтра в значительной мере зависит от диспергирующе-стабилизирующих свойств ММ, адгезионных свойств и скорости поступления загрязнений в СС дизеля. В значительной мере регенерация зависит и от предшествующего ему процесса фильтрации [6,7]. Скорость накопления отложений на ФЭ, плотность и адгезия отложений на фильтрующей перегородке формируют требования к промывочному импульсу. Интенсивность его по скорости и периодичности действия обратного потока должны полностью соответствовать качеству-количественному составу отложений, накапливающихся на фильтровальном материале (ФМ). Его тип и форма переплетения, особенно для тканых материалов, также в значительной мере сказываются на требованиях к режиму промывки.

Таким образом, можно заключить, что скорость промывочного потока, периодичность и продолжительность цикла регенерации в большой степени зависят от параметров СС, форсирования и режимов работы дизеля, качества применяемых горюче-смазочных материалов. Параметры регенерации индивидуальны в зависимости от конструкции СРФ [8]. Подбор режимов регенерации осуществляется эмпирически. Имеется необходимость установить связь между процессами фильтрации и регенерации с учетом условий функционирования СРФ. Требуется разработка методики расчета параметров регенерации для обоснования скорости и продолжительности противоточной промывки наиболее распространенных конструкций СРФ с целью обеспечения их эффективного функционирования в СС судовых форсированных тронковых дизелей.

1. Моделирование процесса регенерации по результатам лабораторных испытаний модуля саморегенерирующегося фильтра

Оценка процесса регенерации состояла в определении его рабочих параметров, обеспечивающих эффективную работу СРФ. Для этого на модельной установке фильтра воспроизвели его характеристики, соответствующие условиям работы автоматизированного МО в двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Режимы физического моделирования, состав искусственного загрязнителя

были подобраны так, чтобы за пять циклов «фильтрация – регенерация» остаточные явления на фильтровальной перегородке с позиции гидравлики и неудаляемых отложений соответствовали состоянию СРФ в эксплуатации за 3 тыс. ч работы.

В работе [6] доказано, что интегральный (суммарный) коэффициент регенерации за 5 циклов «жестких» режимов работы экспериментальной фильтровальной установки соответствует значению этого показателя $\varphi_{p\Sigma}$ в эксплуатации к моменту проведения химической чистки СРФ. Модельная установка СРФ соответствовала конструкции фильтра с периодическим режимом регенерации типа СРФД-120 отечественной конструкции [6, 9] и фильтра 6.33 фирмы Boll & Kirch [3, 10]. Введение оценочного показателя «интегральный коэффициент регенерации» было вызвано необходимостью его определения с высокой точностью, так как за один цикл регенерации значение локального коэффициента регенерации φ_p близко к 1 и фиксация его затруднительна.

Оценка интегрального коэффициента регенерации $\varphi_{p\Sigma}$ в лабораторном эксперименте осуществлялось гидравлическим методом по остаточным явлениям на фильтровальной перегородке сравнением значения перепада давлений при фильтрации $\Delta p_{\Phi\Sigma} = \Delta p_{\Phi 5}$ после 5-го цикла промывки с начальным перепадом давлений $\Delta p_{\Phi 0}$ (рис. 1).

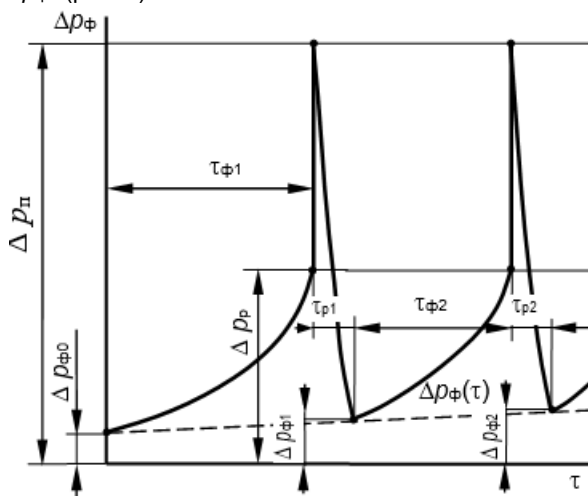


Рис. 1. Гидравлика фильтрации и регенерации при работе СРФ

В лабораторном эксперименте СРФ восстанавливающее действие регенерации по снижению гидравлического сопротивления фильтра на последнем промывочном цикле по отношению к накопительному перепаду давлений на первом (нулевом) этапе фильтрации формирует интегральный коэффициент регенерации, характерный для эксплуатационных условий работы СРФ:

$$\varphi_{p\Sigma} = \frac{\Delta p_p - \Delta p_{\Phi\Sigma}}{\Delta p_p - \Delta p_{\Phi 0}}, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\Phi 0}$, $\Delta p_{\Phi\Sigma}$ – начальный и конечный (после последнего цикла регенерации) перепад давлений при фильтрации, кПа; Δp_p – перепад в конце цикла фильтрации при включении механизма

регенерации, кПа; Δp_n – перепад в начале промывки, кПа.

Эффективность работы промывочного устройства в СРФ с непрерывно работающим механизмом регенерации, когда циклы фильтрации и регенерации кратковременны, а рост перепада давлений и его падение при промывке ФЭ незначительны, эффективность фильтра с рассматриваемых позиций характеризуется коэффициентом стабилизации его характеристик. Этот коэффициент рассчитывается по формуле:

$$\beta_{p\Sigma} = \frac{\Delta p_{\Phi 0}}{\Delta p_{\Phi \Sigma}}. \quad (2)$$

Рост перепада давлений на фильтре из-за остаточных явлений и накопления на фильтровальной перегородке загрязнений, не смываемых при регенерации, составляет:

$$\Delta p_{\Phi \Sigma} = \Delta p_p (1 - \varphi_{p\Sigma}) + \Delta p_{\Phi 0} \varphi_{p\Sigma}. \quad (3)$$

Для возможности трансформирования результатов лабораторного эксперимента с целью определения возможностей СРФ с непрерывным режимом регенерации на основе формул (2) и (3) получена следующая связь между показателями эффективности регенерационного процесса:

$$\beta_{p\Sigma} = \frac{1 - \frac{\Delta p_p}{\Delta p_{\Phi \Sigma}} (1 - \varphi_{p\Sigma})}{\varphi_{p\Sigma}}. \quad (4)$$

Для исследования процесса регенерации были выявлены главные факторы, влияющие на этот процесс [5, 6]. Основным фактором, формирующим коэффициент регенерации, является соотношение продолжительности процессов фильтрации τ_Φ и регенерации τ_p . При этом удельная интенсивность s_{Φ} накопления нерастворимых продуктов (НРП) на фильтре существенным образом влияет на эффективность регенерации и предопределяет необходимость использования комплексного параметра, влияющего на качество промывки ФЭ [6]. Он назван относительной продолжительностью процесса «фильтрация – регенерация», предназначен для учета фильтрации в формировании показателя φ_p и может быть представлен симплексом

$$\bar{\tau}_\Phi = \frac{\tau_\Phi C_x \varphi_\Phi}{\tau_p},$$

где C_x , φ_Φ – концентрация в масле НРП, полнота их отсева при фильтрации, отн. ед.

Вторым по важности во влиянии на процесс регенерации является показатель интенсивности гидродинамического режима промывки, определяемый через соотношение критериев Рейнольдса Re_p/Re_Φ при регенерации и фильтрации, выражаемых через определяющий размер ФМ «номинальная толщина отсева» и «поверхностную» скорость рассматриваемых процессов.

Весьма существенную (доминирующую) роль при смыве отложений играет адгезионная активность отложений Φ_r . Адгезионные свойства оценивали по их удаляемости из фильтровой сетки полотняного переплетения под воздействием стандартного промывочного потока [6]. Чем выше у отложений

промывочный эффект, тем ниже адгезионные свойства. По сути дела, в диапазоне $\Phi_r=0,2-0,9$, этим показателем оценивалась не адгезионная активность, а способность отложений к удалению при промывке. Показатель Φ_r хорошо коррелируется с удаляемостью отложений. С его увеличением регенерационный импульс для смыва отложений уменьшается.

Значительное место в формировании φ_p имеет также показатель эффективности ФМ K_Φ . Физически природа этого коэффициента представлена в работах [4, 5]. Его значение зависит от геометрии и параметров полотняного переплетения фильтровых сеток, т.е. от коэффициента проницаемости, формы пор и пористости материала. Факторы $\Delta_{0,95}/m_d$ и $f_{\Phi\Phi}$ меньше всего, как выявлено в лабораторном эксперименте [6], влияют на эффективность регенерации. Первый из них характеризуется соотношением тонкости отсева ФМ и среднего размера тонкодиспергированных частиц НРП загрязнений ММ. Второй указывает на просветлость (отношение площади отверстий к общей поверхности подложки) опорного каркаса ФМ.

Проведенные натурные лабораторные испытания модели СРФ с использованием теории планирования эксперимента позволили получить регрессионную модель процесса регенерации [6]. Модель представлена в форме позинома. По критерию Фишера доказана её адекватность. Ускоренные испытания позволили получить результаты по интегральному коэффициенту регенерации, которые тождественные данным, характерным для длительных (в течение 2–3 тыс. ч) условий работы СРФ на судах при полнопоточном фильтрации (очистке) ММ дизелей.

Интегральный коэффициент регенерации в зависимости от выше перечисленных факторов может быть представлен следующим выражением:

$$\varphi_{p\Sigma} = \left(\frac{Re_p}{Re_\Phi} \right)^{0,087} \Phi_r^{0,1747} K_\Phi^{0,1434} f_{\Phi\Phi}^{0,053} \times \left(\frac{\tau_\Phi C_x \varphi_\Phi}{\tau_p} \right)^{-0,032} \left(\frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{-0,097}. \quad (5)$$

Через число циклов n_p регенерации он может быть связан с локальным коэффициентом регенерации соотношением $\varphi_p = (\varphi_{p\Sigma})^{1/n_p}$. Эта зависимость справедлива при допущении, что процесс зарастания фильтровой сетки происходит с постоянной скоростью. Принято допущение о постоянстве $\varphi_p = \text{const}$ на всем промежутке работы СРФ между химическими чистками ФЭ, т.е. за период $\tau_{\text{СРФ}}$ его автономной работы.

2. Расчет и анализ регенерационной эффективности СРФ в эксплуатационных условиях

Судовой эксперимент с фильтровальными модулями типа СРФ-60 и СРФД-120 [5] при очистке ММ групп 10(14)–Д₂(цл20, цл30) при работе среднеоборотных тронковых форсированных дизелей на низкосортных топливах показал возможность соблюдения маслоочистителями режима автономного функционирования в течение 3–4 тыс. ч. Такая периодичность обслуживания СРФ возможна, если интегральный коэффициент

регенерации в натуральном виде или сформулированный по показателю β_p к моменту химической чистки ФЭ составлял 0,7. Это нормативное значение $\Phi_{p\Sigma}$ принято для расчета основных показателей промывочного процесса, следование которым позволит соблюсти контрольную автономность $\tau_{СРФ}$ фильтра, равную 3 тыс. ч.

Приравнивая выражение (5) величине $\Phi_{p\Sigma} = 0,7$, получим систему уравнений, по которой, зная относительное время регенерации $\bar{\tau}_p$, можно задать гидравлику промывки по \bar{Re}_p , чтобы реализовать нормативное значение $\tau_{СРФ}$. Возможно решение обратной задачи по гидравлическому режиму обратной промывки \bar{Re}_p находим требуемое время регенерации $\bar{\tau}_p$. Система имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Re_p}{Re_\Phi} &= 0,0167 \Phi_p^{-2} K_\Phi^{-1,65} f_{\Phi\Delta}^{-0,609} \left(\frac{\tau_\Phi c_x \Phi_\Phi}{\tau_p} \right)^{0,368} \left(\frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{1,115}; \\ \frac{\tau_p}{\tau_\Phi} &= 1,2456 \cdot 10^{-4} c_x \Phi_\Phi \left(\frac{Re_p}{Re_\Phi} \right)^{-2,72} \Phi_p^{-5,46} K_\Phi^{-4,48} f_{\Phi\Delta}^{-1,66} \left(\frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^3 \end{aligned} \right\} (6)$$

Объединение уравнений системы (6) позволят сформировать промывочный индекс K_p , по которому можно подобрать СРФ, удовлетворяющий действующим нормативам по основным технико-экономическим показателям с соблюдением требований системы «дизель–эксплуатация–топливо–масло–очистка» (ДЭТМО). В общем виде

выражение для промывочного индекса представляется следующим уравнением:

$$K_p = \frac{Re_p}{Re_\Phi} \left(\frac{\tau_p}{\tau_\Phi} \right)^{0,368} = 0,0167 \Phi_p^{-2} K_\Phi^{-1,65} f_{\Phi\Delta}^{-0,609} (c_x \Phi_\Phi)^{0,368} \left(\frac{\Delta_{0,95}}{m_d} \right)^{1,115} \cdot (7)$$

Выбор параметров регенерации фильтра может осуществляться по промывочному индексу. Его значение, соответствующее конкретным условиям функционирования СРФ, выбираются по зависимости (7).

Она сформированна с учетом смываемости (адгезионных свойств) отложений. Показатель Φ_p зависит от качества применяемых горюч-смазочных материалов, прежде всего от моюще-диспергирующих свойств ММ и интенсивности его старения (карбонизации), наличия асфальто-смолистых продуктов в отложениях.

Как изменяется значение регенерационного индекса моделей СРФ-60 и СРФД-120 по мере ужесточения условий их функционирования иллюстрирует рис. 2. При его формировании учитывалось конструктивные особенности фильтров и условия функционирования их регенерационных устройств.

Градации факторов x_i зависимости (7) осуществлялось равномерно в диапазоне от нижнего значения (-1) до верхнего (+1). Уровни кодированных значений факторов приведены в работах [6, 11].

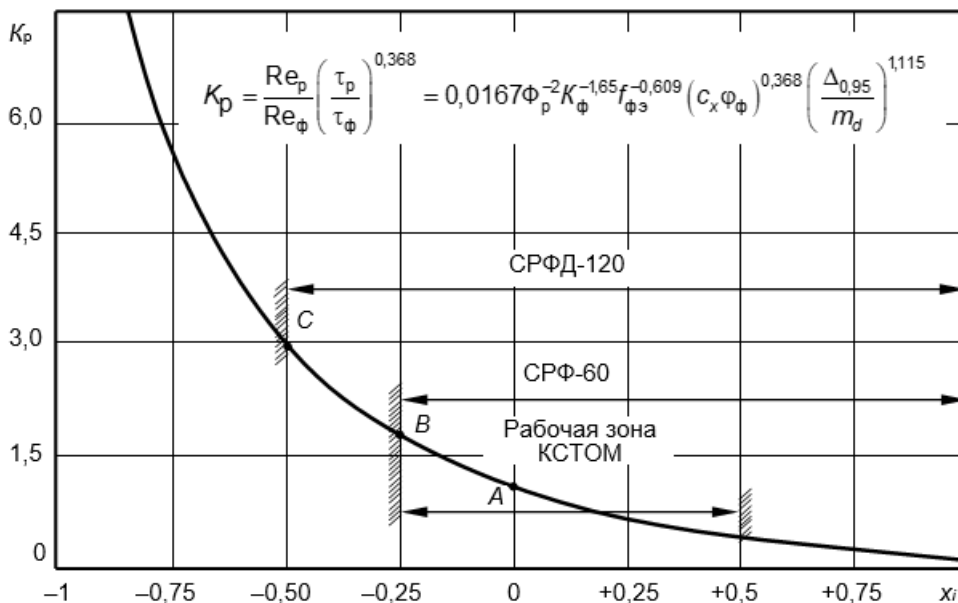


Рис. 2. Влияние на промывочный индекс фильтров основных факторов регенерационного процесса

Для СРФ, функционирующих в СС судовых дизелей, рабочий диапазон K_p находится в пределах 0,5–2. Его формирование осуществлено при равномерном изменении всех факторов в кодированном виде от +0,5 до -0,25. Функционируя в этих условиях, модули СРФ-60 и СРФД-120 способны реализовать режим автономной (необслуживаемой) работы $\tau_{СРФ} = 3$ тыс. ч. Рабочая зона (см. рис. 2) комбинированных систем тонкой

очистки масла (КСТОМ) большинства дизелей при использовании автоматизированных фильтров, созданных на базе модуля СРФ-60 статистически (наиболее часто) реализуется состоянием А ($K_p = 1,13$), а для конструкции СРФД-120 – состоянием В ($K_p = 2$).

Зная значение промывочного индекса для заданных условий функционирования конкретного СРФ, по уравнению (7) можно выбрать основные компоненты его регенерационного процесса.

Возможность варьирования компонентами \overline{Re}_p и $\overline{\tau}_p$ для довольно жестких условий работы модулей СРФ-60 (непрерывный режим регенерации) и СРФД-120 (периодический) показаны на рис. 3.

Наиболее рациональный режим регенерации для СРФ-60 при значении $K_p=1,13$ возможен при непрерывном вращении регенерационного устройства с частотой 0,1–2 мин⁻¹. При использовании патента №163757 на полезную

модель переключение с одной фильтровальной камеры на другую осуществляется мгновенно без потерь времени на перемещение распределителя между ними. В этом случае при относительном времени регенерации $\overline{\tau}_p=0,1$ процесс регенерации будет эффективен, если \overline{Re}_p будет выше 2,66, т.е. скорость промывки ФЭ должна превышать скорость фильтрации почти в 3 раза.

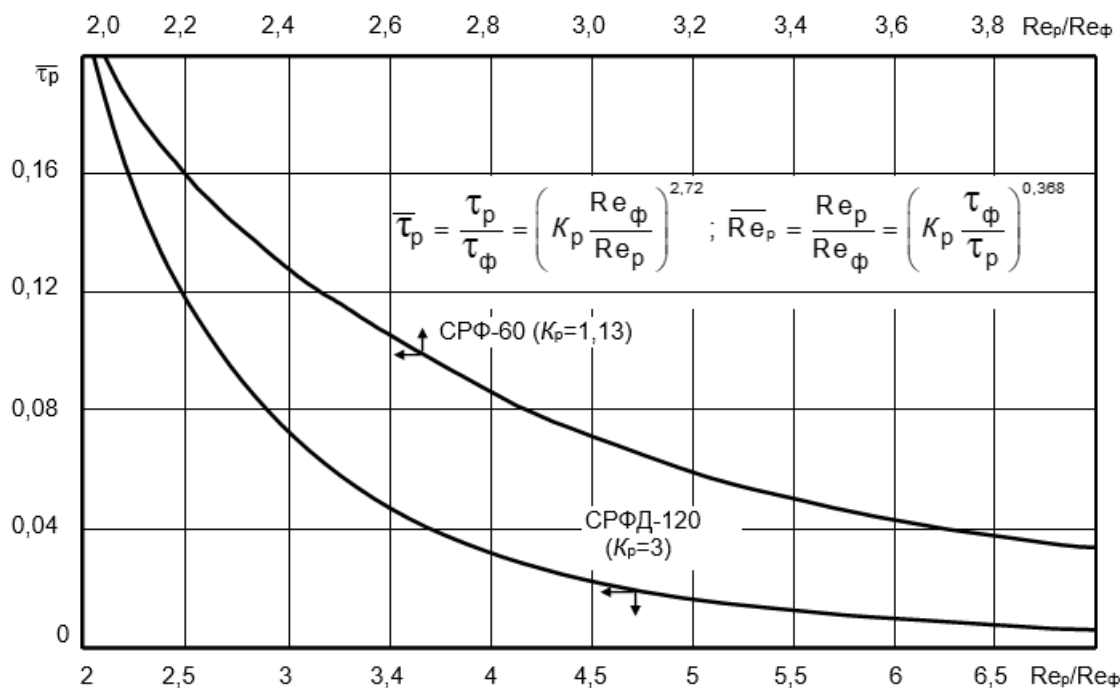


Рис. 3. Зависимость продолжительности регенерации фильтров от соотношения скоростей промывочного и фильтровального потоков

Для модуля СРФД-120 ($K_p=3$) легко реализуем режим промывки $\overline{Re}_p=4,7$, что требует на каждом цикле регенерации воздействовать на отложения для их эффективного смыва в течение $\overline{\tau}_p=0,016$.

Зная возможности регенерационного устройства по интенсивности промывочного импульса (давления воздуха для подачи промывочного масла), можно определить, как часто будет включаться в работу цикл регенерации. По связи показателей $\overline{\tau}_p$ и \overline{Re}_p в регенерационном индексе K_p , варьируя каждым из них, можно обеспечить эффективную промывку ФЭ.

Условия работы СРФ в смазочных системах ДВС на судах, которые полностью воспроизводились при лабораторных испытаниях модели фильтров, приведены в таблице. В ней показано при каких характеристиках звеньев системы ДЭТМО результаты модельных испытаний по определению $\varphi_{p\Sigma}$ можно распространить на эксплуатационные показатели СРФ. Тождественность лабораторных и натурально замеренных значений $\varphi_{p\Sigma}$ соблюдается при соответствии качества топлива и ММ с уровнем форсирования дизеля по среднему эффективному давлению p_{me} .

Апробированные характеристики звеньев ДЭТМО, приводящие к надежной работе дизеля, по состоянию ММ фиксируются следующими

значениями показателей \overline{P} и \overline{N}_r (см. таблицу), определяемыми к моменту отработки им 2 тыс. ч. Доля присадок в ММ, находящихся в активной форме, должна составлять 0,2–0,4 их содержания в свежем масле. При этом необходимо, чтобы дисперсность нерастворимой фазы загрязнений в ММ находилась в пределах $\Delta_{0,95}/m_d=10-60$. Уровень \overline{N}_r грубодисперсной фазы НРП (количество частиц крупнее 5 мкм) должен составлять 75–400 тыс. шт./мл. Статистические показатели по \overline{P} и \overline{N}_r приведены для периода стабилизации параметров старения ММ, что наблюдается через 1–3 тыс. ч его работы [5, 10].

Продолжительность работы СРФ до проведения профилактического осмотра и химической чистки ФЭ определяется по достижению перепада давления $\Delta p_{фд}$, фиксируемого сразу же после цикла регенерации. В этом случае число $n_{х.ч}$ циклов «фильтрация – регенерация», когда необходимо проведение регламентных работ, составляет

$$n_{х.ч} = \frac{\ln \varphi_{рд}}{\ln \varphi_p} = \frac{\ln \left(\frac{\Delta p_p - \Delta p_{фд}}{\Delta p_p - \Delta p_{фо}} \right)}{\ln \varphi_p} \quad (8)$$

Таблица

Состояние ММ в судовых дизелях при стабилизации массо-дисперсного обмена загрязнений в системах смазки

Уровень форсирования дизеля и применяемое масло		Работа на топливе		Доля присадок, находящихся в активной форме	Количество грубодисперсных НРП
p_{me} , МПа	Марка масла	Топливо	Содержание серы, %	\bar{P} , отн. ед.	\bar{N}_r , тыс.шт./мл.
0,5 – 0,8	M-10(14)-Г ₂ (цс)	СМТ	0,1 – 0,5	0,2 – 0,4	75 – 100
	M-10(14)-Д ₂ (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5 – 2	0,3 – 0,4	150 – 200
0,8 – 1,2	M-10(14)-Г ₂ (цс)	СМТ	0,1 – 0,5	0,2 – 0,3	100 – 150
	M-10(14)-Д ₂ (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5 – 2	0,3 – 0,4	200 – 250
	M-14(16)-Д ₂ (цл30)	ДМ, М-40, М-100	2 – 3,5	0,3 – 0,4	300 – 350
1,2 – 2	M-10(14)-Г ₂ (цс)	СМТ	0,1 – 0,5	0,2 – 0,3	150 – 200
	M-10(14)-Д ₂ (цл20)	ДТ, Ф-5, Ф-12	0,5 – 2	0,2 – 0,3	250 – 300
	M-14(16)-Д ₂ (цл30)	ДМ, М-40, М-100	2 – 3,5	0,2 – 0,3	350 – 400

На основе зависимости (7) и (8) получено выражение для расчета и корректировки (в зависимости от условий эксплуатации) срока автономной работы СРФ (периодичности освидетельствования и химической чистки МО)

$$\tau_{СРФ} = \tau_{х.ч} = 3000 \mu_{СРФ} \frac{\Delta p_{фд}}{\Delta p_{ф\sum}} \left(\frac{P_r}{\bar{P}} \right)^{0,85} \left(\frac{\bar{N}_r}{N_{rT}} \right)^{1,24} \quad (9)$$

где P_r , \bar{P} и N_r , \bar{N}_r – реальное и нормативное содержание в масле многофункциональных присадок и грубодисперсных нерастворимых загрязнений; $\mu_{СРФ}=0,7-1,2$ – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности фильтра.

Использование зависимости (9) в практике эксплуатации СРФ позволяет прогнозировать состояние и планировать сроки его профилактического обслуживания с учетом условий работы в системе ДЭТМО. Обобщение опыта использования СРФ, комплектуемых на базе модулей СРФ-60 и СРФД-120 [8, 9], в смазочных системах судовых тронковых дизелей показало, что период их автономной работы может составлять 3–5 тыс. ч. Факторы, вызывающие снижение $\tau_{СРФ}$, состоят в интенсивном срабатывании присадок, не соответствии качества масел применяемом топливам, интенсивном загрязнении ММ НРП при нарушении работы топливной аппаратуры. Значительному увеличению $\tau_{СРФ}$ способствует использование КСТОМ, особенно при дополнительной глубокой очистке масла сепарированием (центрифугированием) [11, 12]. Расчетная зависимость (9) на основе данных, приведенных в таблице, позволяет с высокой

точностью (достоверностью) корректировать показатель $\tau_{СРФ}$.

Выводы

1. Полученная по результатам лабораторных испытаний и выраженная позиномом $\varphi_{p\sum} = f(x_i)$ модель регенерации СРФ трансформирована на эксплуатационные условия работы фильтра, что позволяет идентифицировать параметры механизированной (автоматизированной) промывки его ФЭ обратным потоком расчетом гидродинамической интенсивности и продолжительности этого процесса с учетом адгезионной активности отложений, дисперсности нерастворимых загрязнений и функциональных особенностей маслоочистителя.

2. Доказана работоспособность и адекватность расчетно-экспериментальной модели регенерации СРФ в эксплуатационных условиях при очистке ММ в судовых дизелях. Через нормативное значение интегрального коэффициента регенерации и регенерационный индекс фильтра имеется возможность определять автономный срок работы СРФ в зависимости от срабатывания многофункциональных присадок и содержания в масле грубодисперсных нерастворимых загрязнений.

3. Приведены статистические показатели по интенсивности старения моторного масла при разных уровнях форсирования дизеля в широком диапазоне изменения качества применяемых горюче-смазочных материалов, что позволяет осуществлять обоснованный выбор СРФ и режимов его функционирования в многозвенной системе ДЭТМО и эффективно использовать этот очиститель при комбинированной тонкой очистке масла.

Литература

1. Кича Г. П., Полоротов С. П. Зарубежные автоматические фильтры тонкой очистки масла и топлива судовых энергетических установок // Судостроение за рубежом. 1982. № 3. С. 58–73.
2. Кича Г. П., Артемьев А. К., Надежкин А. В., Шкаренко В. А. Опыт применения и перспективы развития самоочищающихся фильтров в системах смазки судовых ДВС // Двигателестроение. 1985. №7. С. 35–38.
3. Микутенко Ю. А., Шкаренко В. А., Резников В. Д. Смазочные системы дизелей. Л.: Машиностроение, 1986. 125 с.
4. Кича Г. П., Бойко С. П. Идентификация разделительной способности тканых регенерируемых фильтровальных материалов нового поколения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 132–139.
5. Кича Г. П., Перминов Б. Н., Надежкин А. В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. 372 с.
6. Кича Г. П., Бойко С. П. Экспериментальное моделирование эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров, функционирующих в системах смазки судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. 2015. №. 3(29), Т.1. С. 93–100.
7. Dunn, A. R. Selection of wire cloth for filtration and separation // Filtration and Separation. 1980. Vol. 17, N 10. P. 437–451.
8. Кича Г. П., Пак Н. К. Новые инженерные решения в конструкциях саморегенерирующихся фильтров для очистки топлив и смазочных материалов на судах // Морские интеллектуальные технологии. 2013. №. 1. С. 54–59.
9. Кича Г. П., Надежкин А. В., Пак Н. К. Саморегенерирующийся фильтр новой конструкции для очистки топлив и смазочных масел на судах // Научн. пробл. трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 203–207.
10. Lennartz, R. Full flow filtration in lubricating oil systems // Second World Filtration Congress, Proc. London. 1979. P. 541–548.
11. Надежкин А. В., Кича Г. П. Трибомониторинг и трибодиагностика судовых дизелей. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 с.
12. Кича Г. П., Надежкин А. В., Пак Н. К. Оптимизация работы маслоочистительного комплекса судовых двигателей внутреннего сгорания на основе вариационного исчисления // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2012. №3 (12). С. 9–19.

References

1. Kicha G. P., Polorotov S. P. Zarubezhnye avtomaticheskie fil'try tonkoj ochistki masla i topliva sudovyh energeticheskikh ustanovok [Foreign automatic fine filters for oil and fuel of marine power plants] // Sudostroenie za rubezhom. 1982. № 3. S. 58–73.
2. Kicha G. P., Artem'ev A. K., Nadezhkin A. V., SHkarenko V. A. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya samoochishchayushchihysya fil'trov v sistemah smazki sudovyh DVS [Application experience and development prospects of self-cleaning filters in marine ICE lubrication systems] // Dvigatelistroenie. 1985. №7. S. 35–38.
3. Mikutenok YU. A., SHkarenko V. A., Rez-nikov V. D. Smazochnye sistemy dizelej [Diesel lubrication systems]. L.: Mashinostroenie, 1986. 125 s.
4. Kicha G. P., Bojko S. P. Identifikaciya razdelitel'noj sposobnosti tkanyh regeneriruemykh fil'troval'nykh materialov novogo pokoleniya [Identification of the separation ability of a new generation of woven regenerated filter materials] // Nauchnye problemy trans-porta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2015. № 3. S. 132–139.
5. Kicha G. P., Perminov B. N., Nadezhkin A. V. Resursosberegayushchee masloispol'zovanie v sudovyh dizelyah [Resource-saving oil use in marine diesel engines]. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011. 372 s.
6. Kicha G. P., Bojko S. P. Eksperimen-tal'noe modelirovanie effektivnosti processa regeneracii samoochishchayushchihysya fil'trov, funkcioniruyushchih v sistemah smazki sudovyh dizelej [Experimental modeling of the efficiency of the regeneration process of self-cleaning filters operating in marine diesel engine lubrication systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2015. №. 3 (29), T.1. S. 93–100.
7. Dunn, A. R. Selection of wire cloth for filtration and separation // Filtration and Separation. 1980. Vol. 17, N 10. P. 437–451.
8. Kicha G. P., Pak N. K. Novye inzhenernye resheniya v konstrukciyah samoregeneriruyushchihysya fil'trov dlya ochistki topliv i smazochnykh materialov na sudah [New engineering solutions in the design of self-regenerating filters for cleaning fuels and lubricants on ships] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2013. №. 1. S. 54–59.
9. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Samoregeneriruyushchihysya fil'tr novoj kon-strukcii dlya ochistki topliv i smazochnykh masel na sudah [Newly designed self-regenerating filter for cleaning fuels and lubricants in ships] // Nauchn. probl. transp. Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2013. № 1. S. 203–207.
10. Lennartz, R. Full flow filtration in lubricating oil systems // Second World Filtration Congress, Proc. London. 1979. P. 541–548.
11. Nadezhkin A. V., Kicha G. P. Tribomonitring i tribodiagnostika sudovyh dizelej [Tribomonitoring and tribodiagnostics of marine diesel engines]. Mauritius: Palmarium Academic Publishing, 2018. 422 c.
12. Kicha G. P., Nadezhkin A. V., Pak N. K. Optimizaciya raboty masloochistitel'nogo kompleksa sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya na osnove variacionnogo ischisleniya [Optimization of the oil-cleaning complex of marine internal combustion engines based on the calculus of variations] // Vestnik inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2012. №3(12). S. 9–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Петрович Кича, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания, Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: kicha@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

Андрей Вениаминович Надежкин доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

Сергей Петрович Бойко кандидат технических наук, доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морского государственного университета им. адм. Г.И. Невельского 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

Gennadiy P. Kicha, Dr. Sci. (Eng), the professor, head of the Department of marine internal combustion engines; Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy 690003, Vladivostok, Verhneportovaya, 50a, e-mail: kicha@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

Andrey V. Nadezkin, Dr. Sci. (Eng), the professor of the Department of marine internal combustion engines, Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy 690003, Vladivostok, Verhneportovaya, 50a, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

Sergey P. Boiko, Ph.D. (Eng), associate professor of the Department of marine internal combustion engines, Maritime state university named after admiral G.I. Nevel'skoy 690003, Vladivostok, Verhneportovaya, 50a, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел.: (423) 251-52-26

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.083

УДК 621.892.096

Методика для трибодиагностики судовых крейцкопфных дизелей на основе имитационного моделирования

А.В. Голенищев¹, А.В. Надежкин¹, М.Е. Старченко¹¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Рассматриваются подходы по определению пороговых значений концентрации продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле, характеризующие переход объекта диагностирования судового крейцкопфного дизеля из одного технического состояния в другое. Показано, что существующие методики не учитывают индивидуальные особенности и техническое состояние деталей цилиндропоршневой группы. Предложено для решения задачи их трибодиагностики использовать разработанную имитационную модель, позволяющую провести моделирование процесса изнашивания цилиндрической втулки и поршневых колец судового дизеля и на основании полученных расчетов определить концентрацию продуктов износа поступивших в отработанное цилиндрическое масло при различной скорости изнашивания трущихся деталей. Данные о фактической концентрации продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле в дальнейшем соотносятся с результатами моделирования, что позволяет оценить техническое состояние деталей цилиндропоршневой группы двигателя. Представлены результаты моделирования по определению пороговых значений концентрации продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле, характеризующее переход судового дизеля из исправного в неисправное техническое состояние. Даны практические рекомендации по выбору пороговых значений содержания продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле для различных типов судовых крейцкопфных дизелей и условий их эксплуатации.

Ключевые слова: Отработанное цилиндрическое масло, крейцкопфный судовой малооборотный дизель, продукты износа, идентификация технического состояния

Tribology diagnostics of crosshead type diesels based on the simulation modeling

Andrey V. Golenishev¹, Andrey V. Nadezkin¹, Mikhail E. Starchenko¹¹Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy

Abstract. The article examines approaches to determine the threshold values of the concentration of wear debris in used cylinder oil that characterize the transition of a ship crosshead diesel engine unit under test from one technical condition to another. It is shown that the existing methods do not take into account the individual characteristics and technical condition of the parts of the cylinder-piston group. To solve the problem of tribodiagnostics, it is proposed to use the developed simulation model, which allows modeling the wear process of the cylinder bushing and piston rings of a marine diesel engine and, based on the obtained results, determining the concentration of wear products issued in the used cylinder oil at different wear rates of the moving parts. The data on the actual concentration of wear products in the used cylinder oil are subsequently correlated with the simulation model results, which makes it possible to evaluate the technical condition of the parts of the engine cylinder-piston group. The article presents the results of modeling of threshold values determination of the concentration of wear products in used cylinder oil, that measure the transition of a marine diesel engine from a working condition to a malfunctioning technical condition. Practical recommendations are given on choosing threshold values for the concentration of wear products in used cylinder oil for various types of marine crosshead diesel engines and their operating conditions.

Key words: Used cylinder oil, crosshead marine low-speed diesel, wear particles, technical condition identification

Введение

Работающее моторное масло, при правильном подходе, может служить мощным диагностическим инструментом для оценки технического состояния судового двигателя внутреннего сгорания (СДВС). Содержающаяся в нем информация можно получить исследуя состав продуктов износа накапливающихся в масле во время работы силового агрегата. Их подавляющей частью является Fe, образующееся в результате изнашивания трущихся деталей двигателя. А так как процесс изнашивания сопровождается накоплением продуктов износа в работающем масле, то, по уже накопленному их количеству, можно судить о степени изношенности конкретных трущихся сопряжений судового дизеля.

В качестве главных двигателей на большинстве современных судов, применяются крейцкопфные малооборотные дизели (МОД). Одной из присущих данному типу СДВС конструктивной особенностью

является то, что цилиндрическое масло подающееся на поверхность втулки цилиндра используется только один раз, а затем стекает в подпоршневые полости. Следовательно, концентрация продуктов износа в отработанном цилиндрическом масле (ОЦМ) будет непосредственно отражать техническое состояние данного узла трения в текущий момент времени, так как продукты износа от других трущихся сопряжений не имеют возможности попасть в него.

Однако, при использовании ОЦМ в качестве диагностического инструмента, понять в какой момент исправный силовой агрегат переходит в неисправное техническое состояние, не так просто. Ведущие мировые производители судовых дизелей оценивают концентрацию Fe в ОЦМ на уровне 0-200 мг/кг как «зону безопасной работы». Концентрация в 200-300 мг/кг уже является сигналом о выходе из «зоны безопасной работы». При увеличении концентрации общего железа в ОЦМ выше уровня в 300 мг/кг двигатель переходит в «зону», работа в которой недопустима, из за высокой

вероятности отказа СДВС, в следствии значительного увеличения скорости изнашивания его трущихся сопряжений [1].

Однако, в предложенных производителями МОД рекомендации не учитываются индивидуальные особенности различных типов МОД. Так например, рекомендации по предельным концентрациям частиц износа в работающем масле универсальны для СДВС имеющих различные типоразмеры, а следовательно они не отражают в себе размерной специфики конкретного двигателя. Кроме того, следует заметить, что даже у одной и той же модели МОД цикловая подача цилиндрического масла может значительно отличаться, так как его расход определяется техническим менеджментом компании в пределах рекомендации фирмы производителя дизелей. Так же следует отметить, что интенсивность изнашивания деталей цилиндрической группы не в последнюю очередь определяется качеством применяемого топлива [2].

Данные факторы представляют большую важность при использовании индивидуального подхода к оценке состояния СДВС по параметрам его работающего масла.

Цель и задачи

В контексте приведенной выше проблематики, авторы поставили перед собой цель разработать методику по определению пороговых значений концентрации продуктов износа в ОЦМ, которая учитывала бы индивидуальные особенности различных крейцкопфных МОД.

Методы и материалы

В работе [3] была разработана имитационная модель накопления продуктов износа, образующихся в результате трения поршневых колец (ПК) о зеркало цилиндрической втулки (ЦВ) и поступающих в ОЦМ крейцкопфных МОД. Одна из особенностей данной имитационной модели заключающаяся в гибкости выбора начальной точки моделирования. За нее можно принять как двигатель, не имеющий никакой выработки, так и двигатель, цилиндрическая группа которого имеет любой эксплуатационный зазор, вплоть до предельного.

Эпюра износа ЦВ имеет специфическую форму. Наибольшая величина износа наблюдается в верхнем поясе в районе первого ПК при нахождении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ). При движении от ВМТ к нижней мертвой точке величина износа ЦВ резко уменьшается и примерно на расстоянии 1/3 от ВМТ становится практически нулевой.

Путем обработки значительного объема экспериментальных данных была получена аппроксимация эпюры износа ЦВ по высоте [3]. Она может быть описана следующим выражением:

$$z = cS_0^{(a-1)} \exp\left[-(S_0/b)^a\right] \quad (1)$$

где a , b , c – параметры аппроксимирующей зависимости, S_0 – относительный ход поршня. Причем a , b – являются параметрами формы, c – параметром масштаба, описывающим трансформацию во времени.

Именно эта экспериментальная зависимость положена в основу имитационной модели, с

помощью которой, осуществлено моделирование накопления Fe в ОЦМ для двигателей разных типоразмеров и находящихся в разной степени изношенности. А на основании полученных моделей становится возможным выработать методику по определению пороговых значений концентрации продуктов износа в ОЦМ.

Дальнейшая работа включала в себя следующие этапы:

- сбор сведений о типоразмерах наиболее распространенных МОД
- анализ полученных данных
- применение имитационной модели
- оценка адекватности полученных результатов
- выработка рекомендаций по исследованным МОД.

Источником сведений о конструктивных размерах и особенностях подачи цилиндрического масла на зеркало цилиндра в МОД служила техническая литература и справочники. Данный этап проходил совмещено со вторым в рутинном режиме.

Далее происходил процесс моделирования. Ниже представлены его основные этапы.

На начальном этапе необходимо рассчитать подачу масла на зеркало цилиндра:

$$B_{цм} = g_{цм} * P_e * \Delta\tau * k_y \quad (2)$$

где $g_{цм}$ – удельный эффективный расход цилиндрического масла, кг/(кВт·ч); P_e – эффективная цилиндрическая мощность дизеля, кВт; $\Delta\tau$ – промежуток времени, за который рассчитывается расход цилиндрического масла, ч; k_y – коэффициент, учитывающий расход масла на угар.

Затем рассчитывается изменение диаметра ЦВ (D_i^j) в некоторый произвольный момент времени t_i в j -ом сечении:

$$D_i^j = D + 2z_{oi}^j z_{пр} \quad (3)$$

где D – исходный номинальный диаметр ЦВ, мм; $z_{пр}$ – предельный допустимый радиальный износ ЦВ, мм; z_{oi}^j – относительный радиальный износ ЦВ в момент времени t_i в j -ом поясе.

Значение последнего показателя определяется по выражению (3):

$$z_{oi}^j = c_i S_0^{j(a-1)} \exp\left[-(S_0^j/b)^a\right] \quad (4)$$

Относительное изменение диаметра ЦВ Δz_0^1 в верхнем поясе рассчитывается по выражению:

$$\Delta z_0^1 = 0,5 I_{цв} / z_{пр} \quad (5)$$

Необходимо учесть формулу для определения значения коэффициента масштаба c_i+1 (5):

$$c = 1,298 z_0^1 + 0,1532 \quad (6)$$

где z_0^1 – относительная величина увеличения диаметра в верхнем поясе ЦВ.

Следом определяется изменение величины относительного радиального износа Δz_0^j в произвольном j -ом сечении ЦВ за 1 тыс. ч работы:

$$\Delta z_o^j = z_{oi+1}^j - z_{oi}^j \quad (7)$$

В результате можно рассчитать объем изношенного металла ЦВ ($\Delta V_{цв}$) за 1000 ч работы:

$$\Delta V_{цв} = \pi S \int_0^{0,35} (D_i^j + \Delta z_o^j z_{пр}) \Delta z_o^j z_{пр} dS_o \quad (8)$$

И перейти от объема к массе изношенного Fe ЦВ ($\Delta M_{цв}$):

$$\Delta M_{цв} = \Delta V_{цв} K_{Fe} \rho 10^{-3} \quad (9)$$

где ρ – плотность железа, г/см³; K_{Fe} – доля содержания железа в материале ЦВ.

Так же необходимо определить суммарный износ поршневых колец ($\Delta V_{пк}^{\Sigma}$):

$$\Delta V_{пк}^{\Sigma} = \Delta V_{пк}^1 + 0,3\Delta V_{пк}^1 + 0,1\Delta V_{пк}^1 \quad (10)$$

где $\Delta V_{пк}^1$ – объём изношенного материала 1-го ПК за 1 тыс. ч работы, мм³.

Он рассчитывается на основе известных геометрических значений ПК и скорости изнашивания:

$$\Delta V_{пк}^1 = \pi(D + 0,5I_{пк})I_{пк}B \quad (11)$$

где B – высота кольца, мм.

Затем определяется масса изношенного Fe ПК:

$$\Delta M_{пк} = \Delta V_{пк}^{\Sigma} K_{Fe} \rho 10^{-3} \quad (12)$$

где ρ – плотность железа, г/см³; K_{Fe} – доля содержания железа в материале ПК.

В таблице 1 приведены характеристики крейцкопфных МОД для которых проводилось моделирование. Они получили широкое распространение на флоте ДВ бассейна.

В качестве исходных параметров для имитационного моделирования использовались экспериментальные данные скорости изнашивания указанных выше СДВС, которые были представлены компанией производителем [4, 5]. В таблице 2 приведены сводные данные средней интенсивности изнашивания деталей ЦПГ этих двигателей, отвечающие условию нормального протекания процесса изнашивания. Они послужили исходными данными для моделирования.

Таблица 1

Характеристики крейцкопфных МОД

Модель дизеля	Ход поршня S, м	Высота кольца h, мм	Частота вращения n, мин ⁻¹	Цилиндровая мощность Neц, кВт	Расход цилиндрического масла Вч, кг/ч на цилиндр
L35MC	1,05	8	210	650	0,78
L42MC	1,36	8	176	995	1,2
L50MC	1,62	9,5	148	1330	1,46
L60MC	2,022	11	123	1950	2,15
L70MC	2,36	11	109	2725	3,2
S26MC	0,98	5,5	250	400	0,48
S70MC	2,8	12	91	2725	3,7
S80MC	3,2	12	78	4500	6,1

Таблица 2

Данные по скорости изнашивания деталей ЦПГ судовых крейцкопфных МОД [255]

Марка двигателя	Среднее значение скорости изнашивания ЦВ, мкм/1000 ч	Среднеквадратичное отклонение скорости изнашивания ЦВ, мкм/1000 ч	Среднее значение скорости изнашивания ПК, мкм/1000 ч	Среднеквадратичное отклонение скорости изнашивания ПК, мкм/1000 ч
S26MC L35MC L42MC	0,037	0,0318	0,254	0,25
L50MC L60MC L70MC	0,061	0,057	0,457	0,447
S70MC S80MC	0,075	0,046	0,469	0,327

Таблица 3

Уровни пороговых значений концентрации продуктов износа (Fe) (г/т) в пробах ОЦМ полученные в результате имитационного моделирования

Марка двигателя	Первое пороговое значение	Второе пороговое значение
S26MC	80	111,5
L42MC	112,5	157
L50MC	148	208
L60MC	140	197,1
L70MC	116	165
S70MC	108	141
S80MC	81	106

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования интенсивности изнашивания ЦВ и ПК наиболее распространенных на современных судах крейцкопфных МОД представлены в таблице 3.

Традиционно на морском флоте техническое состояние судовых механизмов принято делить на три группы:

1- Удовлетворительное (NORMAL), когда техническое обслуживание и ремонт не требуются.

2- Требуется внимания (CAUTION). Необходимо усилить контроль за работой механизма и принять меры по выявлению причин вызвавших отклонение в его работе. Ему соответствует превышение первого порогового значения.

3- Аварийное (ALERT), когда требуется немедленный вывод объекта из эксплуатации и принятие неотложных мер по устранению причин приведших судовой механизм в такое состояние (превышение второго порогового значения).

Именно для этих типов технического состояния определены пороговые значения, которые приведены в таблице 3.

Таким образом, на основании полученных данных, можно говорить о подтверждении тезиса о важности индивидуального подхода к определению пороговых концентраций продуктов износа в ОЦМ крейцкопфных МОД. Результаты моделирования красноречиво показывают, что для одних двигателей (L60MC) предельные значения концентрации продуктов износа соответствуют общим рекомендациям производителей, а для других (S80MC) превышают их, фактически в два раза.

Выводы

– В статье разработана и представлена методика расчета пороговых значений концентрации продуктов износа в ОЦМ путем имитационного моделирования, характеризующая техническое состояние крейцкопфных МОД и учитывающая их индивидуальные особенности.

– Полученные в результате моделирования данные подтверждают необходимость индивидуального подхода при определении значения пороговой концентрации продуктов износа в ОЦМ для различных типов крейцкопфных МОД.

Литература

1. MAN Diesel and Turbo. SL2014-587 Cylinder Lubrication Update – Adjusting the ACC Factor in Service. Copenhagen. MAN Diesel & Turbo, 2014.
2. Моделирование изнашивания судовых тронковых дизелей при использовании унифицированных моторных масел / Г.П. Кича, А.В. Надежкин, Б.Н. Перминов и др. // Трение и износ. – 2004. – Т. 25. – № 6. – С. 635–641
3. Надежкин, А.В. Трибомониторинг и трибодиагностика судовых дизелей [Текст]: монография /А.В. Надежкин, Г.П. Кича. – Palmarium Academic Publishing, 2018. – 422 с.
4. The MC Engines Service Experience / MAN B&W DIESEL A/S Copenhagen SV Reg. No.: 24231/ – 3rd edition. – November. – 1998 – 13 p. 255
5. Low speed large bore engines now with higher power concentration [Электронный ресурс]. – Augsburg: MAN Diesel SE, 2007. – Режим доступа <http://www.manbw.com> 238

Reference

1. MAN Diesel and Turbo. SL2014-587 Cylinder Lubrication Update – Adjusting the ACC Factor in Service. Copenhagen. MAN Diesel & Turbo, 2014.
2. G.P. Kicha, A.V. Nadezhkin, B.N. Perminov i dr. Modelirovanie iznashivaniya sudovyh tronkovykh dizelej pri ispol'zovanii unificirovannyh motornyh masel.[Modeling the wear of marine diesel engines using unified engine oils] Trenie i iznos. – 2004. – Т. 25. – № 6. – С. 635–641
3. A.V. Nadezhkin, G.P. Kicha. Tribomonitoring i tribodiagnostika sudovyh dizelej [Tekst]: monografiya. [Tribomonitoring and tribodiagnosics of marine diesel engines] – Palmarium Academic Publishing, 2018. – 422 s.
4. The MC Engines Service Experience / MAN B&W DIESEL A/S Copenhagen SV Reg. No.: 24231/ – 3rd edition. – November. – 1998 – 13 p.
5. Low speed large bore engines now with higher power concentration. – Augsburg: MAN Diesel SE, 2007. – <http://www.man-es.com>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владимирович Голенищев, старший научный сотрудник учебно-научной испытательной лаборатории химмотологии, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел: (423) 251-52-26

Андрей Вениаминович Надежкин, доктор технических наук, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: nadezkin@msun.ru, тел: (423) 251-52-26

Михаил Евгеньевич Старченко, младший научный сотрудник учебно-научной испытательной лаборатории химмотологии, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: starchenko.m.e@gmail.com, тел: (423) 251-52-26

Andrey V. Golenishev, Senior Researcher, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, Verhneportovaja 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation e-mail: nadezkin@msun.ru

Andrey V. Nadezkin, Dr. Sci. (Econ), the professor of the Department of marine internal combustion engines, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, Verhneportovaja 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: nadezkin@msun.ru

Mikhail E. Starchenko, Junior researcher, Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, Verhneportovaja 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: starchenko.m.e@gmail.com

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.068

УДК 629.12.001.2

Определение весовых коэффициентов по факторам влияния эргатического элемента судна на морскую аварийность в дальневосточном регионе

И.Б. Друзь¹, М.В. Гомзяков²¹ Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ² Дальневосточное управление государственного морского надзора

Аннотация. Проведен анализ аварийности морского флота в дальневосточных морях за период 2011-2018 гг. Целью работы является установление весовой доли эргатического элемента, структурированной по функциям и уровням ПДНВ-78 с поправками 2010 года, в создании предпосылок к аварии при эксплуатации судовых энергетических установок и их основных элементов: главных и вспомогательных двигателей, рулевых машин, электрических и других систем. Основные задачи для достижения цели: анализ аварийности на предмет некорректной функциональности судового персонала согласно минимальным стандартам компетентности международной конвенции ПДНВ-78 с поправками; определение меры ответственности причастных к АС лиц; определение эргатических весовых коэффициентов и направлений для их практического применения. Результаты исследования имеют большое значение для прогнозирования безопасной эксплуатации судов и их судовых энергетических установок в дальневосточном регионе.

Ключевые слова: безопасность мореплавания, судовые энергетические установки, человеческий фактор, эргатические весовые коэффициенты, аварийность.

Finding of weighting factors by factors of the influence of the ergatic element of the vessel on accidents at sea in the far east

Ivan B. Druz', Mihail V. Gomzyakov²¹ Maritime State University named named Admiral G. Nevelskoy, ² Far East Directorate for State of Maritime Supervision

Abstract. The article contains the analysis in the sea accidents at Far Eastern region for the period 2011-2018. The main idea of the article is the finding of ergatic weights of human factor in the accidents at sea into STCW-78 with amendments standards, and the role of the human factor in creating of the failures for the ship's power plants background. Most of failures of ship technical equipment are: breakdowns of the main engines, auxiliary diesel generators, auxiliary mechanisms, steering gear, electrical equipment, automation systems. The main objectives of the article is crew competency analysis involved in the accident with failures of ship technical equipment, finding of ergatic weights of human factor, forming a base of ergatic scales in the format of professional competences, making practical recommendations. Research findings are important for making the forecast of shipping safety, safety ship control and reliable operation of power plants at Far Eastern region.

Keywords: safety of navigation, ship power plant, human factor, operational regulations, ergatic weights, accidents at sea.

Введение

Транспортный комплекс Дальнего Востока Российской Федерации является активным участником международного морского сообщества. Данное обстоятельство обязывает поддерживать качество услуг по перевозке грузов морем на высоком технологическом уровне, сопоставимым или превосходящим таковой у конкурентов.

Нарушения обязательных нормативных требований (ОНТ) в области безопасности мореплавания (БМ) приводят, как показывает практика, к выходу за рамки эксплуатационного режима судовых технических средств (СТС), что, в свою очередь, может служить началом развития аварийного сценария.

Под безопасностью мореплавания в рамках данной работы следует понимать совокупность процедур, обеспечивающих штатный и безаварийный процесс функционирования судна. Судно при этом рассматривается как сложная эргатехническая система [4], включающая в себя СТС, эргатическое звено (оператор-машина), нормативно-правовой компонент.

Исследование экспертных заключений по аварийным случаям на предмет выявления нарушений судовым персоналом ОНТ при эксплуатации морско-

го судна с аварийным исходом, является необходимым звеном в цепи обратной связи мер по повышению безопасности мореплавания [3].

Актуальность работы обусловлена удобным географическим расположением и возрастающим геополитическим значением дальневосточного сегмента РФ в международном транспортном процессе.

На федеральном и региональном уровнях в последнее время отмечается повышенный интерес к проблемам морских дальневосточных грузоперевозок. Отмечается рост исследований в части влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания [2], однако вопросы весового распределения функциональности и ответственности эргатического звена на частоту аварий в морях дальневосточного региона подробно не рассматривались.

Основные понятия и терминология

В рамках данной работы «человеческий фактор» и «звено оператор-машина» являются синонимичными понятиями.

Под аварийным случаем подразумевается любое транспортное происшествие на море, зарегистрированное морскими спасательно-координационными центрами и размещенное в базах данных (БД) государственных информационных систем (ГИС), неза-

висимо от того, как данный случай квалифицируется официальными правилами расследования ПРАС-90 (Положение действовало до 2014 года) или ПРАИМ-2013[6].

Девиантное функционирование (ДФ) – исполнение судовым персоналом своих должностных обязанностей с отклонением от требований минимальных стандартов компетентности или от иных обязательных нормативных требований, которое привело к нештатной работе судна или его технических средств. Причины ДФ в рамках работы не рассматриваются.

Информационная база исследования:

- база данных аварийных случаев (БДАС) Управления государственного морского и речного надзора (Госморречнадзора);
- акты расследования аварийных случаев территориальным органом Госморречнадзора – Дальневосточным управлением государственного морского надзора (ДВУ Госморнадзора);
- информация из открытых морских ГИС.

Цели и задачи исследования

Цель данной работы – определение значимости эргатического звена оператор-машина (ЗОМ) на предварительном этапе эксплуатации морского судна и его энергетической установки.

Для достижения заявленной цели необходимо решение следующих задач:

- анализ актов расследования аварийных случаев (АС) в дальневосточных морях за достаточно продолжительный период;
 - исключение АС по причинам воздействия непреодолимой силы;
 - исследование АС, произошедших по причинам девиантного функционирования ЗОМ, послужившего причиной аварии;
 - структурирование фактов ДФ по стандартам компетентности;
 - определение меры причастности к АС членов экипажей различных уровней управления;
 - формирования базы натуральных весовых коэффициентов ДФ в формате профессиональных компетенций;
 - определение доли ДФ при эксплуатации судовых энергетических установок и их элементов.
- Объектом исследования является качество эксплуатации судна и его технических средств.

Предмет исследования: девиантное функционирование звена оператор-машина.

Область исследования: разработка методов и систем обеспечения безопасности мореплавания в современных условиях с учетом человеческого фактора.

Новизна и значимость работы

Научная новизна состоит в том, что в работе:

- на основе анализа актов расследования АС установлена величина влияния ЧФ на морскую аварийность в конкретном регионе;
- предложены натурные, структурированные по международным стандартам компетентности, весовые коэффициенты влияния ЗОМ аварийность в ДВ регионе;
- разработаны и обоснованы методологические основы для дистанционной оценки риска аварийно-

сти в условиях отдельного региона РФ на основе данных ДФ ЗОМ из государственных информационных систем;

Практическая значимость работы заключается в апробации методики, при которой анализ данных из существующих ведомственных ГИС позволяет прогнозировать риски участникам морского транспортного процесса. Данная методика открывает новые перспективы в дистанционном контроле и управлении рисками БМ.

Используемые в докладе подходы и методики систематизации данных по результатам расследований морских аварий за многолетний период могут лечь в основу разработок:

- систем управления рисками как морского, так и других видов транспорта;
- учебным заведениям и учебно-тренажерным центрам – программ базовой и дополнительной подготовки судового персонала;
- службам капитанов морских портов – стандартам дипломирования моряков;
- контролирующим органам – систем планирования надзора за деятельностью судоходных компаний;
- судоходным компаниям – систем управления безопасностью (СУБ) судов.

Алгоритмы, разработанные по данной методике, реализованы в программном обеспечении в дальневосточном подразделении Управления государственного морского и речного надзора (УГМРН). Начиная с 2015 года в ДВУ Госморнадзора функционирует корпоративный программный комплекс НАДЗОР, аккумулирующий информацию об аварийных случаях и нарушениях обязательных нормативных требований [8, 12]. В БД комплекса регистрируются конкретные нарушители требований БМ, как с аварийными последствиями, так и без таковых. Информация о нарушениях положена в основу риск-ориентированного формирования планов проверок судовладельцев на 2018-2020 гг. [11]. В настоящее время Министерством транспорта РФ на основе аналогичных ПК НАДЗОР алгоритмов дистанционного мониторинга разрабатывается система управления рисками (СУР), пилотный проект которой запущен в июле 2019 и должен быть внедрен в 2021 году.

Достоверность полученных результатов проведенных исследований основана на исследовании реальных процессов, происходящих в ДВ регионе, и подтверждается корректным применением научных методов решения поставленных задач, достоверностью и значительным объемом исходных данных, хорошей сходимостью с данными сторонних экспертов.

Методологические основы исследования

Источником исходных данных является БД с результатами расследований аварийных случаев за 2011-2018 гг. в подконтрольной сфере ДВУ Госморнадзора, размещенная на официальном сайте Ространснадзора [9, 17]. Статистика аварийности в источниках распределена по годам, видам аварии и тяжести последствий [17].

В рамках решения основных задач работы в первую очередь были выявлены АС, однозначно отнесенные к действиям непреодолимой силы (форс-

мажор, ФМ). Данная информация содержится в обязательном разделе акта расследования «причины АС». На рис. 1 приведено распределение доли «форс-мажор» и ЧФ.

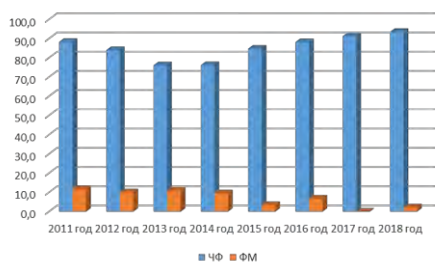


Рис. 1. Доля АС под воздействием непреодолимой силы

Затем из БДАС за указанный период произведена выборка происшествий, случившихся по причине достоверно установленного ДФ эргатического звена. Доля ЧФ (336 случаев из 393), колеблется от 75% в 2014 году до 92% в 2018, составляя в среднем 85,5 % с тенденцией к росту. Данное обстоятельство убедительно подтверждает необходимость поиска новых подходов к управлению безопасностью мореплавания.

Аварии с причастностью человеческого фактора характеризуются степенью ДФ от минимальных стандартов компетентности (МСК) при осуществлении торгового мореплавания.

Анализ актов расследования АС показывает, что чаще всего аварийные последствия возникают в результате цепочки связанных и несвязанных между собой отклонений от МСК. Цепь событий может иметь следующую структуру: электроперсонал осуществлял работы с аварийным дизель-генератором, не известив вахтенную службу - вахтенный механик не обеспечил горячий резерв дизель-генераторов – палубная команда запустила крупный потребитель – произошло обесточивание судна на достаточно продолжительный период – вахтенный помощник в условиях неработающих приборов упустил время для принятия эффективных мер – аварийный случай в виде посадки на мель, столкновения или иных последствий.

Априори при выходе судна в рейс принимается, что экипаж соответствует конвенционным требованиям по количеству членов и уровню квалификации. Инспекция портового контроля выпускает судно в рейс только при отсутствии угроз БМ. Все исследованные АС с причастностью ЧФ содержат информацию о том, что судам был разрешен выход в море. Факт наличия аварий в таких условиях свидетельствует о недостаточном внимании к эргатическому элементу ЗОМ и необходимости переоценки влияния ЧФ на качество мореплавания.

Методика компетентностного взвешивания аварий на море заключается в следующем.

Анализом «причин аварии» из актов расследований АС выделено восемь групп факторов влияния. Под группой факторов следует понимать функцию ЗОМ на морском судне, ненадлежащее ДФ которой привело к АС. Каждый аварийный случай рассматривается последствие нарушений МСК на трех уровнях ответственности: управления; эксплуатации; вспомогательном. Всего групп восемь: Ф1. Судовождение; Ф2. Обработка и замещение грузов; Ф3. Эксплуата-

ция судна и забота о людях; Ф4. Судовые механические установки; Ф5. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления; Ф6. Техническое обслуживание и ремонт; Ф7. Радиосвязь. Помимо семи конвенционных функций необходимо рассматривать специфическую деятельность, связанную с промыслом морских биоресурсов. Ф8. Правила промысла. Функциональность ЗОМ рыболовных судов в части безопасности мореплавания учитываются в рамках МСК (рис. 2).

Уровень управления — это уровень ответственности, связанный с принятием решения по службе – штурманской или технической – капитан, старший помощник капитана, старший или второй механик.

Уровень эксплуатации – уровень ответственности с принятием решений в пределах вахты и/или заведования, вахтенный помощник капитана, вахтенный механик, электромеханик, радиооператор, судовой врач.

Вспомогательный уровень связан с выполнением назначенных задач, обязанностей под контролем лиц вышестоящих уровней – матрос, моторист, электрик, токарь, рыбообработчик.

Предлагаемый подход позволяет учитывать «вес» каждого звена в цепи предпосылок аварийной ситуации, персональный «вклад» в АС каждого нарушителя обязательных нормативных требований на уровне его ответственности и компетентности.

Современные подходы к учету аварийности российского флота

Исследование БДАС, размещенной на официальном сайте Ространснадзора и структурированной по годам статистики аварийности с разбивкой по причинам, видам транспорта, тяжести последствий [17] позволяет представить обобщенный сценарий развития аварийной ситуации следующим образом (рис. 2).



Рис. 2. Обобщенный сценарий развития аварийной ситуации

На рисунке: ЗОМ – звено оператор-машина; У – управление; Э – эксплуатация; В – вспомогательный. Продолжение эксплуатационного цикла – вариант развития сценария, при котором кратковременное ДФ формально не было зарегистрировано в информационных системах как АС. В рамках расчетов весовых коэффициентов во внимание не принимается по причинам отсутствия информации в БДАС.

Совокупность обстоятельств (условий) эксплуатационного цикла судна, включающих в себя как внешние, так и внутренние факторы, могут прямо или косвенно способствовать возникновению аварийной ситуации или непосредственно явиться причиной аварии. Примерами могут служить: выбор опасного курса в случае неверной оценки метеобстановки или отказ энергетической установки при проходе судном узкости, что впоследствии может завершиться аварийным

случае (инцидентом, аварией или очень серьезной аварией). В отдельных случаях непосредственной причиной возникновения аварии с различными последствиями становятся обстоятельства непреодолимой силы (форс-мажор). Аналогичный подход к развитию аварийной ситуации отмечается в работах других исследователей в области безопасности мореплавания [5,7].

Статистические органы Ространснадзора к причинам АС относят [17]: ненадлежащая организация ходовой навигационной вахты и штурманской службы; отклонение от общепринятых приёмов и способов управления судном; неверная оценка гидрометеорологических условий плавания; несоблюдение обязательных нормативных требований (ПТЭ, ПТЭ СТСИК, ПТЭ СРП, нарушение правил морской буксировки; ТБ, ППБ).

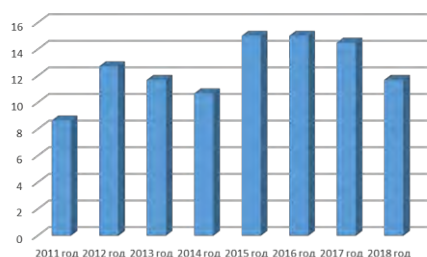


Рис. 3. Распределение морской аварийности в ДВ регионе за 2011–2018 гг

На рис. 3 показано распределение АС по годам в процентах от общего количества аварий за период 2011–2018 г. Всего за указанные временной диапазон в ГИС по дальневосточному региону зарегистрировано 393 АС, включая транспортные и рыболовные суда [5, 13].

Представляется предпочтительный и перспективным подход такой подход к проблеме аварий на море, при котором ответственность оператора, действия которого привели к АС, сопоставляется со стандартами компетентности ПДНВ-78 [18]. Смещение фокуса на обстоятельства, предшествующие отказу СТС или ошибке управления судном (компонент сценария развития аварии на рис. 1) позволяет установить истоки ДФ моряка и выработать превентивные профилактические меры по недопущению происшествий в будущем.

«Показатели аварийности на море по видам» в статистических отчетах Ространснадзора [17] содержат 12 категорий, удобных для учета и сравнения по равнозначным календарным периодам. Однако данная структура, но способна характеризовать, и как следствие – приводит к искаженным выводам для принятия корректирующих действий. Например, и повреждение главного двигателя (ГД) и короткое замыкание могут сопровождаться взрывом или пожаром, имея в истоках абсолютно разные первопричины.

В заключениях по расследованиям АС, составленных ДВУ Госморнадзора, указываются причастные к аварии лица, перманентный учет компетентности которых можно использовать в целях управления безопасностью мореплавания. Без воздействия на первичное звено в аварийной цепи

обеспечение безопасности торгового мореплавания является трудноразрешимой задачей.

Анализ материалов расследований АС показал устойчивую зависимость числа аварий от качества человеческого фактора – компетентности операторов СТС. Устойчивая зависимость количества АС от качества эргатического элемента ЗОМ остается неизменной на судах различных ведомств, разных лет постройки [9,10,14], при работе в различных районах ДВ региона [15], а также сезонности судоходства [16].

Компетентностные факторы влияния на частоту аварий

Для определения компетентностных факторов влияния целесообразно воспользоваться методикой, применяемой на практике другими исследователями в области безопасности мореплавания оценки риска для морского судна [7] с использованием теории вероятности и математической статистики.

При этом принимаются допустимыми следующие условия:

- развитие АС происходит в рамках предложенного сценария (рис. 2);

- аварийный случай состоит из ряда

последовательных несовместных событий совместных событий B_i ;

- группа несовместных событий

представляет совокупность случаев девиантного функционирования ЗОМ вида с порядковым номером j ($j = 1, 2, \dots, J$) в рамках отдельной функции ПДНВ-78 / ($l = 1-8$), с вредом для людей или окружающей среды, при этом причиной причинения вреда служит только

одно событие A_{ji}^l ;

- группа совместных событий B_i , с определенной

вероятностью после наступления события A_{ji}^l , т. е. это событие может оказаться причиной столкновения, посадки на мель, гибели судна с i -м видом последствий.

Весовые оценки отказов j -го вида с i -м ущербом в пределах функции l рассчитываются как

$$\omega(A_{ji}^l) = \frac{\sum_i N_{jil}}{\sum_j \sum_i \sum_l N_{jil}} \quad (1)$$

где: ω – весовой коэффициент компетентностного

фактора влияния на появление события A_{ji}^l ; N_{jil} – нарушение минимальных стандартов компетентности или иных нормативных требований при эксплуатации судна.

Полученные таким образом коэффициенты можно использовать, применяя настоящую методику, в дальнейших расчетах для прогнозирования интенсивности и вероятности АС.

Структура групп (функций) факторов влияния различна, сформирована по аналогии с видами аварий, применяемыми при статистическом учете АС Ространснадзором. В таблице 1 приведен состав группы факторов влияния – шестой функции ПДНВ-78 – «Техническое обслуживание и ремонт».

Система компетентностной классификации и группировки факторов влияния, используемая при анализе статистических данных по аварийным отказам ЗОМ, базируется на учете относительного

«вклада» каждой функции Φ_i в итоговую статистику АС. Факторы влияния внутри отдельной функции имеют буквенно-цифровое обозначение P_{ij} , где i – номер функции, j – номер фактора в группе.

Таблица 1

Группа факторов влияния функции «Техническое обслуживание и ремонт»

Группа факторов влияния, функция ПДНВ-78	Последствия отказа звена «оператор-машина»
	Отказ и поломка ГД и его элементов
	Отказ и поломка ВДГ
	Отказ и поломка РМ и элементов ВРГ
	Нарушение работы содовых систем
	Отказ вспомогательных механизмов
Ф6 - Техническое обслуживание и ремонт	Отказ прочих элементов СЭУ

Количество последствий отказа ЗОМ в пределах каждой функции различно и выбирается по результатам апостериорного анализа АС.

Аварийный случай A_j , классифицируемый в БД Ространснадзора по видам повреждений судна или СТС, согласно результатам расследования, наступил в результате нарушения МСК.

Таблица 2

Натурные коэффициенты распределения МСК по функциям, видам АС и ответственности

Уровни	Уровень управления		Уровень эксплуатации		Уровень вспомогательный		МСК абс.
	Абс.	$K_{прив}$	Абс.	$K_{прив}$	Абс.	$K_{прив}$	
Ф1:	114	0,1330	112	0,1307	1	0,0012	227
посадка на мель	37	0,0432	35	0,0408	0	0,0000	72
навал	40	0,0467	39	0,0455	0	0,0000	79
столкновение	18	0,0210	20	0,0233	0	0,0000	38
гибель судна	3	0,0035	2	0,0023	0	0,0000	5
прочее	16	0,0187	16	0,0187	1	0,0012	33
Ф2:	7	0,0082	7	0,0082	1	0,0012	15
смещение груза	4	0,0047	4	0,0047	0	0,0000	8
погрузка	1	0,0012	1	0,0012	1	0,0012	3
прочее	2	0,0023	2	0,0023	0	0,0000	4
Ф3	25	0,0292	26	0,0303	56	0,0653	107
ТБ при палубных работах	2	0,0023	3	0,0035	29	0,0338	34
ТБ при швартовке	0	0,0000	0	0,0000	3	0,0035	3
ППБ	19	0,0222	17	0,0198	14	0,0163	50
разливы	1	0,0012	3	0,0035	3	0,0035	7
прочее	3	0,0035	3	0,0035	7	0,0082	13
Ф4	100	0,1167	56	0,0653	3	0,0035	159
ГД	54	0,0630	25	0,0292	0	0,0000	79
ВДГ	3	0,0035	5	0,0058	0	0,0000	8
РМ	11	0,0128	7	0,0082	0	0,0000	18
системы	11	0,0128	6	0,0070	1	0,0012	18
СВМ	11	0,0128	6	0,0070	1	0,0012	18
прочее	10	0,0117	7	0,0082	1	0,0012	18
Ф5	1	0,0012	27	0,0315	1	0,0012	29
обесточивание	0	0,0000	4	0,0047	0	0,0000	4
сопротивление изоляции	1	0,0012	12	0,0140	1	0,0012	14

Уровни	Уровень управления		Уровень эксплуатации		Уровень вспомогательный		МСК
	Абс.	$K_{прив}$	Абс.	$K_{прив}$	Абс.	$K_{прив}$	
Вид АС							абс.
аппаратура управления	0	0,0000	7	0,0082	0	0,0000	7
прочее	0	0,0000	4	0,0047	0	0,0000	4
Ф6	103	0,1202	114	0,1330	15	0,0175	232
ГД	52	0,0607	40	0,0467	1	0,0012	93
ВДГ	2	0,0023	6	0,0070	1	0,0012	9
РМ	11	0,0128	14	0,0163	0	0,0000	25
системы	11	0,0128	21	0,0245	4	0,0047	36
СВМ	17	0,0198	19	0,0222	3	0,0035	39
прочее	10	0,0117	14	0,0163	6	0,0070	30
Ф7	0	0,0000	2	0,0023	0	0,0000	2
аппаратура управления		0,0000	1	0,0012	0	0,0000	1
сопротивление изоляции		0,0000	1	0,0012	0	0,0000	1
Ф8	34	0,0397	36	0,0420	16	0,0187	86
намотки	32	0,0373	34	0,0397	2	0,0023	68
работы с тралом	1	0,0012	1	0,0012	6	0,0070	8
работы с ловушками	0	0,0000	0	0,0000	5	0,0058	5
прочее	1	0,0012	1	0,0012	3	0,0035	5

функции Φ_i по фактору P_{ij} на уровне управления U_j , эксплуатации Δ_j или вспомогательном V_j . При условии, что авария произошла под воздействием фактора P_j исключительно в пределах одной функции нарушения стандартов по фактору P_j определяется как

$$j = U_j + \Delta_j + V_j. (2)$$

По отдельной функции

$$\Phi = \sum_{j=1}^J P_j. (3)$$

В случае, когда причинами аварии являются совокупность нарушений МСК различных функций, фактор влияния P_j учитывается в каждой из групп Φ_i . Общая сумма МСК по всем функциям определяется как

$$МСК = \sum_{i=1}^8 \Phi_i. (4)$$

Все МСК сведены в табл. 2 по функциям, видам АС и ответственности.

Для группы факторов влияния Φ_i определяется групповой коэффициент k_i

$$k_i = \Phi_i / МСК (5)$$

Для факторов влияния P_j – коэффициент k_j

$$k_j = P_j / МСК (6)$$

Доля ответственности причастных к аварии лиц определяется отдельно по каждому из трех уровней

$$K_{Uj} = U_j / МСК (7)$$

$$K_{\Delta j} = \Delta_j / МСК (8)$$

$$k_{Vj} = V_j / МСК (9)$$

К особенностям подхода с компетентным «взвешиванием» следует отнести оценку ошибки эргатического звена по функциям и уровням конвенции с учетом специфики деятельности, связанной с добычей биоресурсов моря. В настоящее время квалификационные требования к морякам и рыбакам при выдаче дипломов практически одинаковы, с оговоркой, что первым проставляется ограничение «только не рыболовные суда». Таким образом, с определенными допущениями, можно считать правила промысла отдельной дополнительной функцией, реализуемой только экипажами добывающих судов в установленных районах промысла.

Сравнительный анализ коэффициентов табл. 3 подчеркивает важность основного компонента судна – судовой энергетической установки: сумма факторов влияния человеческого фактора на АС по функции Техническое обслуживание и ремонт превышает суммарный показатель функции Судовождение.

На рис. 4 приведено распределение по функциям влияние (в виде МСК) эргатического элемента на аварийность в ДВ регионе.

Рассчитанные по нарушениям МСК коэффициенты сведены в табл. 2.

Сумма коэффициентов по уровням и функциям составляет единицу.

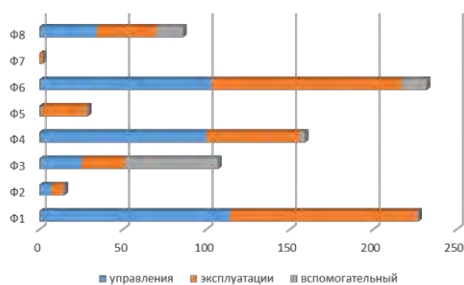


Рис. 4. Распределение причин аварийности по МСК

Апостериорный анализ показывает, что ответственность за аварийность на море практически в равной степени распределяется между штурманской и механической службой, а в пределах служб – между высшим и средним командирским составом. Исключение составляет функция 3 – Управление операциями и забота о людях, где завышен показатель вспомогательного уровня. Согласно данным актов расследования АС такое положение сложилось из-за пренебрежения лицами, относящимися к рядовому составу (матросы, мотористы, электрики, рыбообработчики), правилами техники безопасности, пожарной безопасности и другими ОНТ.

Прикладное значение работы

Результаты данного исследования могут быть использованы участниками торгового мореплавания при оценке рисков для морских судов.

Используя фундаментальные понятия теории вероятностей, и ориентируясь на рассчитанные натурные коэффициенты, можно рассчитать, как средне-статистическую вероятность возникновения АС по методике, предложенной исследователями [7]. Задача оценки риска в рамках данного исследования не ставилась и здесь не приводится.

Методика расчета коэффициентов и уже определенные коэффициенты могут быть использованы при разработке и внедрении Минтрансом РФ системы

управления рисками при проведении дистанционного мониторинга торгового мореплавания, учитывая при этом, что полученные значения натуральных весовых коэффициентов носят региональный характер и могут различаться в зависимости от места осуществления судоходства. В случае персонализации первоначальных АС в рамках интегрированной ГМЧ появляется возможность наиболее эффективного управления компетентностью судового персонала, а, следовательно, снизить риск отказа ЗОМ.

Представляется действенной мерой регистрация в государственных системах и индивидуальных электронных документах моряка причастность его к АС и/или к выявленным при осмотрах судов существенным несоответствиям («эксплуатационная история»). Полученный в ходе данного исследования коэффициенты могут служить базисом для определения текущей компетентности специалиста.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке/корректировке программ базовой и дополнительной подготовки [1].

Заключение и выводы

1. Произведен анализ информации об аварийных случаях на море в зоне ответственности ДВУ Госморнадзора за период 2011-2018 гг;
2. Установлена величина воздействия эргатического элемента на показатель аварийности;
3. Выполнен анализ факторов влияния на причины аварийности с группировкой по функциям и уровням ПДНВ-78;
4. Определены натурные весовые коэффициенты АС, приведенные к минимальным стандартам компетентности.
5. Установлен вес эргатического влияния на аварийность звена оператор-машина в части эксплуатации судовых энергетических установок и их элементов.
6. Выработаны рекомендации участникам торгового мореплавания в дальневосточном регионе по снижению риска аварийности.

Литература

1. Соболенко А. Н., Глазюк Д. К. Повышение эффективности и безаварийности работы СЭУ посредством тренажерной подготовки её операторов. «Рыбное хозяйство» № 1, – М.:, 2014 г. С.12–14.
2. Соболенко А.Н. Совершенствование мероприятий по обеспечению безаварийной работы судовых энергетических установок [Электронный ресурс] : международная научная конференция, г. Владивосток, 19–23 сентября 2016 г. / Дальневост. федерал. ун-т: отв. ред. А. Т. Беккер, В. И. Петухов. – Электрон. дан. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2016. – Режим доступа: <https://www.dvfu.ru/science/publishing-activities/catalogue-of-books-fefu/>. – загл. с экр.
3. Соболенко А. Н. Характерные аварийные отказы судовых дизелей в эксплуатации по причине человеческого фактора. Морские интеллектуальные технологии. № 3(33) Т.1. 2016. С. 173–179
4. Глазюк Д. К., Соболенко А. Н. Оценка надёжности судовой энергетической установки как сложной эргатической системы. Морские интеллектуальные технологии. № 3(33) Т.1. 2016. С. 204–208.
5. Шурпяк В. К. Анализ аварийности на судах и технология технического наблюдения. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=2395>(дата обращения: 12.02.2019).
6. Об утверждении Положения о порядке расследования аварий или инцидентов на море: приказ Министерства трансп. РФ от 08 октября 2013 г. № 308. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=226517> (дата обращения: 01.02.2019).
7. Фаустова, О. Г. Методика оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при мультимодальных перевозках. Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. 2014. № 1. С. 109–116.
8. Оловянных, А. Л. Программный комплекс Дальневосточного управления государственного морского надзора федеральной службы по надзору в сфере транспорта. И. П. Турищев, А. Л. Оловянных, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Пленарные доклады одиннадцатой международной научно-практической конференции. 2–4 октября 2015 г. – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2015. – 68 с.

9. Соболенко А. Н. Анализ технических отказов на промысловых судах в дальневосточном регионе // А. Н. Соболенко, И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко. Вестник Астраханского государственного технического университета. серия: морская техника и технология. 2019. № 3 (август). С. 48-55.
10. Турищев, И. П. Правоприменительная практика дальневосточного управления государственного морского надзора федеральной службы по надзору в сфере транспорта по состоянию на 31.08.2017 года. И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко. Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады двенадцатой международной научно-практической конференции. 18–20 октября 2017 г. – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2017. С. 297–306.
11. Гомзяков, М. В. Риск-ориентированный подход при осуществлении контрольно-надзорной деятельности Дальневосточного управления государственного морского надзора с учетом аварийности объектов, эксплуатируемых поднадзорными компаниями. И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко, И. Б. Друзь. Проблемы транспорта Дальнего Востока. сб. науч. тр. – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2017. – 188 с.
12. Лентарев, А. А. Повышение эффективности контрольно-надзорной деятельности дальневосточного управления государственного морского надзора с применением риск-ориентированного подхода за счет использования информационных технологий [текст] / А. Л. Оловянный, И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко // Морские интеллектуальные технологии № 3 (37) т. 2. – 2017. С. 178–183
13. Гомзяков, М. В. О компетентности специалистов морского флота. О. В. Ибрагимова, А.Л. Оловянный, М. В. Гомзяков. Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч – Владивосток : Дальрыбвтуз, 2018. – Ч. I. – 319 с. С. 242–246
14. Гомзяков, М. В. Сравнительный анализ результатов надзорной деятельности ДВУ Госморнадзора и инспектирования судов капитанами морских портов дальневосточного бассейна. И. П. Турищев, О. Н. Ибрагимова, О. В. Москаленко, М. В. Гомзяков // материалы V Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч – Владивосток : Дальрыбвтуз, 2018. – Ч. I. – 319 с. С. 238–242
15. Друзь И. Б. Безопасность функционирования судовых энергетических установок возрастных судов в зоне ответственности ДВУ Госморнадзора. И. Б. Друзь, И. П. Турищев, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко. Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. № 4(37) С. 41–50
16. Турищев, И. П. Доклад о правоприменительной практике ДВУ Госморнадзора за I полугодие 2019 Публичные слушания. П.-Камчатский. – 2019. 27 с.
17. Госморречнадзор Анализ и состояние аварийности / Сведения об аварийности с судами на море и внутренних водных путях : [Электронный ресурс] : URL : <http://sea.rostransnadzor.ru/funktsii/rassledovanie-transportny-h-proisshes/analiz-i-sostoyanie-avarijnost> (дата обращения: 01.05.2019)
18. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ-78) с поправками.

References

1. Sobolenko A. N., Glazyuk D. K. Povyshenie effektivnosti i bezavariinosti raboty SEU posredstvom trenazhernoi podgotovki ee operatorov. [Improving the efficiency and trouble-free operation of the SPP through the simulator training of its operators]. «Rybnoe khozyaistvo» № 1, – М.:, 2014 g. s. 12–14.
2. Sobolenko A. N. Sovershenstvovanie meropriyatii po obespecheniyu bezavariinoi raboty sudovykh energeticheskikh ustanovok [Improving measures to ensure trouble-free operation of ship power plants] [Elektronnyi resurs] : mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, g. Vladivostok, 19–23 sentyabrya 2016 g. / Dal'nevost. federal. un-t: otv. red. A.T. Bekker, V.I. Petukhov. – Elektron. dan. – Vladivostok : Dal'nevost. federal. un-t, 2016. – Rezhim dostupa: <https://www.dvfu.ru/science/publishing-activities/catalogue-of-books-fefu/>. – Zagl. s ekr.
3. Sobolenko A.N. Kharakternye avariinnye otkazy sudovykh dizelei v ekspluatatsii po prichine chelovecheskogo faktora. [Improving measures to ensure trouble-free operation of ship power plants]. Morskii intellektual'nye tekhnologii. № 3(33) T.1. 2016. S. 173-179
4. Glazyuk D.K., Sobolenko A.N. Otsenka nadezhnosti sudovoi energeticheskoi ustanovki kak slozhnoi ergatekhnicheskoi sistemy. [Reliability assessment of a ship power plant as a complicated ergatechnical system]. Morskii intellektual'nye tekhnologii. № 3(33) T.1. 2016. S. 204-208.
5. Shurpyak V. K. Analiz avariinosti na sudakh i tekhnologiya tekhnicheskogo nablyudeniya. [Vessel accident analysis and technical surveillance technology]. URL:<http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=2395>(data obrashcheniya: 12.02.2019).
6. Ob utverzhdenii Polozheniya o poryadke rassledovaniya avarii ili intsidentov na more: prikaz Ministerstva transp. RF ot 08 oktyabrya 2013 g. № 308. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=-226517> (data obrashcheniya: 01.02.2019).
7. Faustova, O. G. Metodika otsenki riskov vozniknoveniya chrezvychainykh situatsii pri mul'tikanal'nykh perevozkakh. [Methodology for assessing the risks of emergencies in multi-channel transportation] Vestnik astra-khanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2014. № 1. Str. 109-116.
8. Olovyanikov, A. L. Programmnyi kompleks Dal'nevostochnogo upravleniya gosudarstvennogo morskogo nadzora federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere transporta. [The software package of the Far East Directorate for State Maritime Supervision]. I. P. Turishchev, A. L. Olovyanikov, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko. Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Plenarnye doklady odinnadsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2–4 oktyabrya 2015 g. – Vladivostok: DVO Rossiiskoi Akademii transporta, 2015. – 68 s.
9. Sobolenko A. N. Analiz tekhnicheskikh otkazov na promyslovyykh sudakh v dal'nevostochnom regione. [Analysis of technical failures on fishing vessels in the Far Eastern region]. A. N. Sobolenko, I. P. Turishchev, M. V. Gomzya-

- kov, O. V. Moskalenko. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. seriya: morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2019. № 3 (avgust). S. 48-55.
10. Turishchev, I. P. Pravoprimeritel'naya praktika dal'nevostochnogo upravleniya gosudarstvennogo morskogo nadzora federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere transporta po sostoyaniyu na 31.08.2017 goda. [Law enforcement practice of the Far East Directorate of State Maritime Supervision of the Federal Transport Supervision Service as of August 31, 2017.] I. P. Turishchev, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko. Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady dvenadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 18–20 oktyabrya 2017 g. – Vladivostok: DVO Rossiiskoi Akademii transporta, 2017. S. 297–306.
 11. Gomzyakov, M. V. Risk-orientirovannyi podkhod pri osushchestvlenii kontrol'no-nadzornoj deyatel'nosti Dal'nevostochnogo upravleniya gosudarstvennogo morskogo nadzora s uchedom avariinosti ob"ektov, ekspluatiruemykh podnadzornymi kompaniyami. [A risk-based approach in the supervision activities of the Far East Directorate of State Maritime Supervision taking into account the accident rate into supervised companies]. I. P. Turishchev, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko, I. B. Druz' Problemy transporta Dal'nego Vostoka. sb. nauch. tr. – Vladivostok: DVO Rossiiskoi Akademii transporta, 2017. – 188 s.
 12. Lentarev, A. A. Povyshenie effektivnosti kontrol'no-nadzornoj deyatel'nosti dal'nevostochnogo upravleniya gosudarstvennogo morskogo nadzora s primeneniye risk-orientirovannogo podkhoda za schet ispol'zovaniya informatsionnykh tekhnologii. [Improving the efficiency of the supervision activities of the Far East Directorate of State Maritime Supervision using a risk-based approach through the use of information technology]. A. L. Olovyannikov, I. P. Turishchev, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko. Morskie intellektual'nye tekhnologii № 3 (37) t. 2. – 2017. S. 178–183
 13. Gomzyakov, M. V. O kompetentnosti spetsialistov morskogo flota. O. V. Ibragimova, A.L. Olovyannikov, M. V. Gomzyakov. [On the competence of marine specialists]. Materialy V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : v 2 ch – Vladivostok : Dal'rybvuz, 2018. S. 242–246
 14. Gomzyakov, M. V. Sravnitel'nyi analiz rezul'tatov nadzornoj deyatel'nosti DVU Gosmornadzora i inspektirovaniya sudov kapitanami morskikh portov dal'nevostochnogo basseina. [Comparative analysis of the results of the supervision activities of the Far East Directorate of State Maritime Supervision and the Far Eastern Maritime Administration inspection of ships]. I. P. Turishchev, O. N. Ibragimova, O. V. Moskalenko, M. V. Gomzyakov. materialy V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : v 2 ch – Vladivostok : Dal'rybvuz, 2018. – Ch. I. S. 238–242
 15. Druz' I. B. Bezopasnost' funkcionirovaniya sudovykh energeticheskikh ustanovok vozrastnykh sudov v zone otvetstvennosti DVU Gosmornadzora. [Operational safety of ship power plants of age vessels in the area of responsibility of the Far East Directorate of State Maritime Supervision]. I. B. Druz', I. P. Turishchev, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko. Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. – 2018. № 4(37) S. 41–50
 16. Turishchev, I. P. Doklad o pravoprimeritel'noi praktike DVU Gosmornadzora za I polugodie 2019. [Report on law enforcement practice of the Far East Directorate of State Maritime Supervision for the first half of 2019]. Publichnye slushaniya. P.-Kamchatskii. – 2019. 27 s.
 17. Gosmorrechnadzor Analiz i sostoyanie avariinosti Svedeniya ob avariinosti s sudami na more i vnutrennikh vodnykh putyakh [Accident information with ships at sea and inland waterways]. : [Elektronnyi resurs] : URL : <http://sea.rostransnadzor.ru/funksii/rassledovanie-transportny-h-prois-shes/analiz-i-sostoyanie-avarijnost> (data obrash-cheniya: 01.05.2019)
 18. Mezhdunarodnaya konventsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesanii vakhty (STCW-78) s popravkami. [International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Борисович Друзь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского Верхнепортовая, ул., 50,а, Владивосток, 690059 e-mail: druz_ib@mail.ru

Ivan B. Druz Dr. Sci. (Eng), the professor of chair of the theoretical mechanics&resistivity of materials Maritime State University named Admiral G. Nevelskoy, Verhneportovaya, 50 a, Vladivostok 690003, Russian Federation e-mail: druz_ib@mail.ru

Михаил Владимирович Гомзяков, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела надзора за мореплаванием Дальневосточное управление государственного морского надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта Нижнепортовая, ул., 3, Владивосток, 690003 e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru

Mihail V. Gomzyakov, Ph.D. (Eng), associate professor, the chief of Department of supervision over the navigation The Far East Directorate for State of Maritime Supervision, Nizhneportovaya, a 3., Vladivostok, 690003, Russian Federation e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.066

УДК 519.876.5

Результаты исследования пространственно-корреляционных характеристик однолучевого ионосферного декаметрового канала связи

И.М. Орошук¹, И.Е. Гуреев¹, А.Н. Сучков¹, М.В. Соловьев¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-частотных характеристик ионосферного декаметрового канала связи, проведенных на базе новейшего ионозонда-радиопеленгатора размещенного в г. Ростов-на-Дону. При исследовании оценивалось временное рассеяние принимаемого сигнала на частотах не превышающих максимально применимую частоту радиотрассы при приеме интерференционного поля всех дискретных лучей и для случая приема отдельных дискретных лучей с диффузной многолучестью, выделенных узконаправленной антенной ионозонда-радиопеленгатора. На основе обработки результатов экспериментов получены пространственно-частотные характеристики ионосферного канала декаметровой связи, характеризующие зависимость временного рассеяния принятого сигнала от частоты и угла прихода отраженного ионосферного луча, позволяющие производить выбор оптимального угла позиционирования антенны в вертикальной плоскости и оптимальной рабочей частоты по критерию минимума временного рассеивания сигнала. С учетом технологических возможностей приема сигналов с временным рассеиванием, приведен результат вычисления достигаемых скоростей работы модемов в ДКМ каналах связи для различных вертикальных углов позиционирования приемной направленной антенны.

Ключевые слова: цифровая антенная решетка, декаметровый диапазон, направленные свойства, помехоустойчивость, ионосферное зондирование, временное рассеяние, многолучесть, скорость передачи информации.

Results of a study of spatial correlation characteristics of a single beam ionospheric decameter communication channel

Igor M. Oroshchuk¹, Igor E. Gureev¹, Andrey N. Suchkov¹, Mikhail V. Soloviev¹¹Higher Pacific Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the spatial-frequency characteristics of the ionospheric decameter communication channel, based on the latest ionosonde radio direction finder located in Rostov-on-Don. In the study, the temporal scattering of the received signal was evaluated at frequencies not exceeding the maximum applicable radio path frequency when the interference field of all discrete beams is applied and for the case of receiving individual discrete beams with diffuse multi-learning distinguished by a narrowly directed antenna of the ion-probe-direction-finder. Based on the processing of the experimental results, the spatial and frequency characteristics of the decameter communication ionospheric channel are obtained, which characterize the dependence of the temporal scattering of the received signal on the frequency and angle of arrival of the reflected ionospheric beam, allowing the choice of the optimal antenna positioning angle in the vertical plane and the optimal operating frequency according to the criterion of the minimum time signal scattering. Taking into account the technological capabilities of receiving signals with temporary dispersion, the result of calculating the achieved speeds of modems in DCM communication channels for various vertical positioning angles of a receiving directional antenna is presented.

Key words: digital antenna array, decameter range, directional properties, noise immunity, ionospheric sounding, time scattering, multipath, information transfer rate.

Введение

В настоящее время для ведения дальней радиосвязи стали широко использоваться системы спутниковой и волоконно-оптической связи, системы же радиосвязи декаметрового (ДКМ) диапазона составляют лишь небольшой сегмент в рамках услуг дальней связи. Однако в последнее время наблюдается тенденция «возрождения» радиосвязи ДКМ диапазона, связанная с прогрессом в области цифровых технологий, а так же цифровых методов обработки и передачи сигналов. Применение новых технологий позволило устранить многие недостатки этих систем, что гарантирует наличие ниши для систем дальней радиосвязи ДКМ диапазона.

Одним из перспективных направлений развития систем дальней радиосвязи являются исследования и разработка систем передачи сигналов ДКМ диапазона

с использованием цифровых антенных решеток (ЦАР). Цифровые антенные решетки – это приемные системы, способные воспринять всю информацию, содержащуюся в структуре пространственно-временных электромагнитных полей на раскрытие антенной решетки (АР), и при минимальном уровне потерь трансформировать ее в данные в сложной сигнально-помеховой обстановке. Такие системы с возможностью цифрового формирования диаграммы направленности могут существенно повысить эффективность применения систем радиосвязи [1 – 10].

Основным недостатком радиосвязи ДКМ диапазона являются относительно низкое ее качество (вероятность связи с допустимой достоверностью). Этот недостаток обусловлен, в первую очередь, особенностью распространения

радиоволн ДКМ диапазона и во многом обусловлен наличием быстрых (интерференционных) замираний принимаемых сигналов, а также временному рассеянию передаваемых импульсов. Они вызваны наложением радиоволн при дискретной многолучевости и рассеянием радиоволн на неоднородностях ионосферы, приводящее к диффузной многолучевости, наблюдаемой в каждом дискретном луче.

Таким образом, при использовании всего отраженного поля формируется многолучевая ионосферный канал, который при передаче дискретных сигналов значительно влияет на помехоустойчивость ДКМ канала за счет возникновения мультипликативных помех и временного рассеивания сигналов, вызывающего межсимвольную интерференцию, которая существенно ограничивает скорость передачи информации. В связи с этим исследование способа устранения влияния многолучевости в ионосферных каналах ДКМ связи является актуальной задачей.

Механизм образования различных видов многолучевости при распространении радиоволн (РРВ) ДКМ диапазона иллюстрируется на рис. 1, 2.

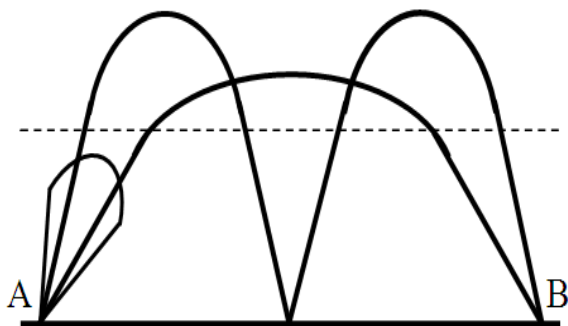


Рис. 1. Образование дискретной многолучевости

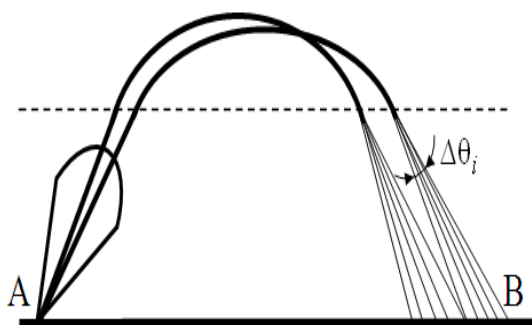


Рис. 2. Образование диффузной многолучевости

Многолучевость РРВ ДКМ диапазона (дискретная и/или диффузная) характеризуется максимальным временем запаздывания лучей в точку приема, которое вызывает возникновение быстрых интерференционных замираний принимаемых сигналов и ограничение полосы частотной когерентности (полосы частот неискаженной передачи), приводящих к снижению помехозащищенности и пропускной способности радиоканала.

Для борьбы с дискретной многолучевостью возможно использовать передающие или приемные следящие антенны (фазированные антенные решетки (ФАР)) с узкой шириной ДН, а также

цифровые антенные решетки с обработкой сигналов, обеспечивающее выделение одного луча и требуемое ослабление дискретных лучей по другим направлениям [1,2 и 14].

Учитывая, что в современных системах радиосвязи используется в основном передача дискретных сообщений, помехоустойчивость ДКМ связи оценивается вероятностью ошибочного приема ($P_{ош}$) информационного символа (элемента сигнала) [16, 17]. Поскольку в состав линий радиосвязи входит среда распространения радиоволн (РРВ), то достижимая в них $P_{ош}$ определяется в первую очередь условиями РРВ (поглощением, рефракцией, многолучевостью и т. д.) и помеховой обстановки. Помехи в радиолиниях ДКМ-диапазона носят наиболее многообразный и сложный характер в силу существенного влияния на распространение сигналов в ДКМ диапазоне состояния среды (ионосферы) и перегруженности этого диапазона помехами посторонних радиостанций [10].

Для обеспечения требуемого значения $P_{ош,доп}$ необходимо, чтобы отношение сигнал/помеха (c/p) на входе приемника превышало некоторую минимально допустимую величину

$$h_0^2 = \overline{P_c} / \overline{P_n} \geq h_{доп}^2 \quad (1)$$

Использование остронаправленных антенн позволяет повысить помехоустойчивость ДКМ канала от глубоких замираний сигналов вызванных дискретной многолучевостью.

При приеме сигналов на ненаправленную антенну в радиоприемнике создается суммарное поле приходящих дискретно-диффузных ионосферных лучей с замираниями релейского характера, то вероятность ошибки $P_{ош}$ принятого сигнала при некогерентном приеме сигналов ЧТ в каналах ДКМ связи определяется [17]:

$$P_{ош} = \frac{1}{2 + h_0^2} \quad (2)$$

В случае приема одного дискретного луча в приемнике будет создаваться суммарное поле одного луча, подверженного только диффузному рассеиванию. В этом случае глубина быстрых замираний определяется отношением:

$$\gamma^2 = \alpha_p^2 / 2\sigma_b^2, \quad (3)$$

где α_p^2 и $2\sigma_b^2$ – мощности регулярной и флуктуационной составляющих коэффициента передачи канала связи с быстрыми замираниями.

В предельном случае наиболее глубоких замираний релейского типа, характеризующихся отсутствием регулярной составляющей ($\alpha_p^2 = 0$), значение $\gamma^2 = 0$. В частном случае отсутствия замираний, когда $2\sigma_b^2 = 0$, значение $\gamma^2 \rightarrow 0$.

При райсовских (квазирелейских) замираниях, когда $0 < \gamma^2 < \infty$ функциональная зависимость между $P_{ош}$ некогерентного приема сигналов ЧТ и среднем отношении c/p (h_0^2) имеет вид [16, 17]:

$$P_{ош} = \frac{\gamma^2 + 1}{2(\gamma^2 + 1) + h_0^2} \exp \left[-\frac{\gamma^2 h_0^2}{2(\gamma^2 + 1) + h_0^2} \right]. \quad (4)$$

Графики зависимости $P_{ош}$ от $h_0^2 = \overline{P_c} / \overline{P_n}$ при приеме сигналов частотной телеграфии на ненаправленную и узконаправленную антенну представлены на рис. 3.

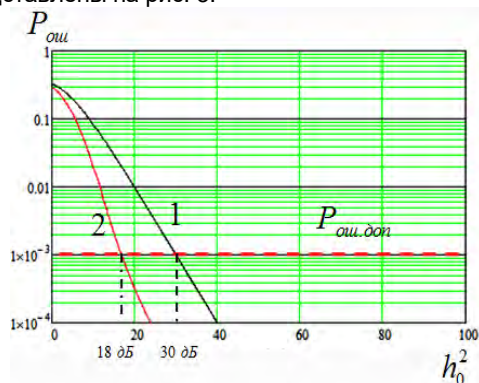


Рис. 3. Помехоустойчивость некогерентного приема сигналов (1 - при релейские замираниях, 2 - при квазирелейевских замираниях)

Так как допустимая вероятность ошибки для телеграфной связи составляет 10^{-3} [19], то энергетический выигрыш при использовании остронаправленных антенн при вероятности ошибки не ниже допустимой составляет 12 дБ (16 раз) по мощности.

Кроме перечисленных факторов влияния многолучевости, вызывающее возникновение замираний принимаемых сигналов, запаздывание лучей при многолучевости приводит к временному рассеиванию передаваемых импульсов (относительному их удлинению при приеме), которое создает межсимвольную интерференцию принимаемых дискретных сигналов. Это в свою очередь приводит к снижению достоверности и скорости передачи передаваемой дискретной информации [11-13].

Следует заметить, что приходящие в точку приема подлучи диффузного рассеяния одного дискретного луча будут иметь, как и при дискретной многолучевости, примерно одинаковые амплитуды. Однако их относительное время запаздывания (временное рассеяние) будет значительно меньше ($\Delta\tau_i \leq 50 - 200$ мкс), чем при дискретной многолучевости ($\Delta\tau_i = 0,3 - 1$ мс) [15].

В результате, при использовании классических ненаправленных антенн суммарное временное рассеяние лучей составляет не менее 1 мс, что ограничивает минимальную длительность импульса не менее чем до 2 мс [15]. В случае же использования узконаправленных антенн в вертикальной плоскости возникает возможность выделения отдельного дискретного луча подверженного только диффузному рассеиванию (см. рис. 2), который может иметь меньшее временное рассеяние – до 0,2 мс.

Для определения характеристик временного рассеяния отдельных лучей было проведено исследование с помощью новейшего ионозонда-радиопеленгатора на базе ЮФУ г. Ростов-на-Дону [18].

В 2012 г. проведено обновление технологической базы измерений на ионоферной станции, курируемой специалистами НИИ Физики ЮФУ г. Ростов-на-Дону. Устаревшее оборудование было заменено современным антенно-фидерным комплексом и ионозондом-радиопеленгатором.

Созданный новый, не имеющего мировых аналогов инструмент – ионозонд-радиопеленгатор с ЛЧМ-сигналом позволяет проводить загоризонтную радиолокацию ионоферной в ДКМ диапазоне на современном техническом уровне. Современный ионозонд-радиопеленгатор позволяет измерять не только дистанционно-частотные и амплитудно-частотные характеристики, но и угловые частотные характеристики (рис. 4), и может быть использован для решения научных и прикладных задач в области радиосвязи, радиопеленгации, радиолокации и радионавигации для диагностики ионоферного канала на трассах с различной протяженностью и направлением в различных геофизических условиях, а также для адаптации радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн по результатам зондирования.

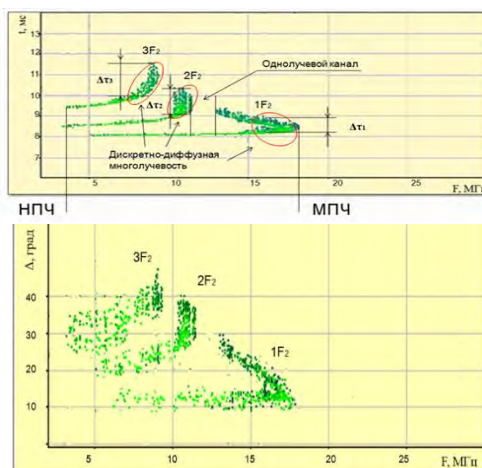


Рис. 4. Измеряемые характеристики ионозонда-радиопеленгатора: (а) – дистанционно-частотные (б) – угловые частотные характеристики

В ходе исследования ионоферного канала были получены результаты экспериментальных данных наклонного зондирования ионоферного ДКМ канала, которые представлены на рис. 5 – 6. Для этого по дистанционно-частотным характеристикам (рис. 4, а) определялось временное рассеяние $\Delta\tau$ (мс) в частотном диапазоне между МПЧ и НПЧ (FP/ФМПЧ), приходящих в точку приема дискретных лучей с отдельными признаками диффузного рассеяния (выделенные зоны «овалом» на ионограмме) при ионоферном распространении ДКМ волн. Угловые частотные характеристики применялись для определения углов прихода отдельных дискретных лучей в частотном диапазоне между НПЧ и МПЧ.

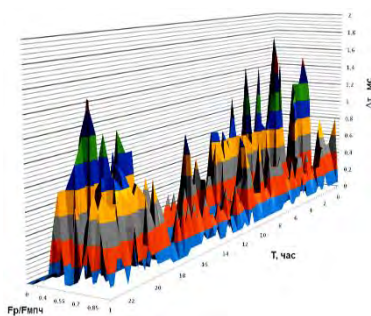


Рис. 5. Временное рассеяние суммарного сигнала при приеме на ненаправленную антенну

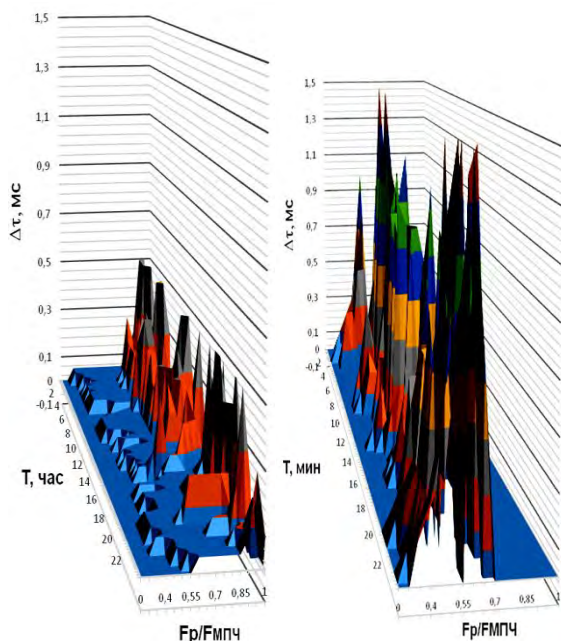


Рис. 6. – Временное рассеяние сигнала при приеме на узконаправленную антенну при углах прихода луча в вертикальной плоскости:
а) 10 – 20 градусов; б) 30 – 40 градусов

После обработки полученных результатов экспериментальных данных была получена зависимость временного рассеяния от угла прихода лучей ионосферного канала ДКМ связи рис. 7.

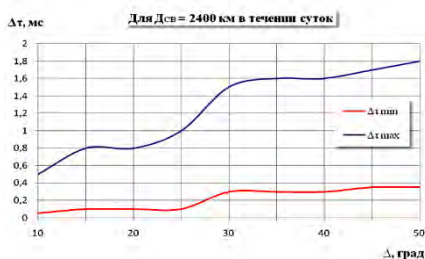


Рис. 7. Зависимость временного рассеяния от углов прихода ионосферного луча

Известно, что для передачи дискретной информации при построении решающих систем для борьбы с межсимвольной интерференцией оптимальная длительность импульса должна составлять $\tau_0 \geq 1,5 \Delta t_{\text{тр}}$. Учитывая это можно рассчитать максимально допустимую скорость передачи дискретных сообщений:

$$B = \frac{1}{1,5 \cdot \Delta t_{\text{тр}}}, \text{ Бод} \quad (5)$$

С учетом выражения (5) и величины временного рассеивания в зависимости от угла прихода луча в вертикальной плоскости, была получена зависимость изменения скорости передачи дискретных сообщений в зависимости от величины временного рассеивания $\Delta t_{\text{тр}}$ и угла прихода луча в вертикальной плоскости при передаче дискретных сигналов ионосферного ДКМ канала (рис. 8).

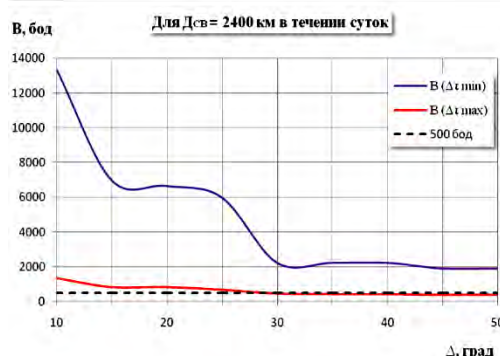


Рис. 8. Зависимость скорости передачи от временного рассеяния и угла прихода ионосферного луча

Таким образом, проведенные ионосферные исследования и результаты анализа временного рассеяния показали, что переход на однолучевые каналы ДКМ связи позволяют увеличить скорость передачи дискретных сигналов до 13333 Бод.

Кроме того, результаты анализа временного рассеяния показали, что наименьшему рассеянию подвержены лучи приходящие под меньшим углом к горизонту в вертикальной плоскости. Следовательно, для обеспечения максимальной скорости передачи информации необходимо позиционировать диаграмму направленности узконаправленных приемных антенн так, чтобы выделить один дискретный луч под меньшим углом к горизонту, который подверженный меньшему временному рассеиванию.

Литература

1. Слюсар В. И. Цифровое формирование луча в системах связи: Будущее рождается сегодня. / В. И. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – №1. – С. 6–12.
2. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / Л. Н. Григорьев. – М. : Радиотехника, 2010. – 144 с
3. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Возможности неэквидистантных цифровых антенных решеток с

- пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2015. – С. 302–305. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Методика оценки помехоустойчивости декаметровых радиоканалов поверхностной волны // Техника радиосвязи. – 2017. – № 3 (34). – С. 19–29.
4. Орошук И.М., Долгих В.Н., Сучков А.Н. Вероятностные характеристики пространственно-корреляционного метода обнаружения сигналов в декаметровом диапазоне // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2013. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html>.
 5. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. *Acoustical Physics*. 2007(53); 2:190-196. New York (in Eng.).
 6. Орошук И.М., Сучков А.Н., Мельник С.Л., Соловьев М.В. Вероятностная оценка обнаружения радиолокационного сигнала цифровой антенной решеткой с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2019. – № 6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/2/text.pdf>.
 7. Орошук И.М., Сучков А.Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2015. – № 2. С. 17–26. URL: <http://vestnikis.dvfu.ru/images/2015-2-3.pdf>.
 8. Орошук И.М., Сучков А.Н. Жариков-Горский В.А. Моделирование пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в цифровых антенных решетках декаметровых радиоэлектронных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 3. – С. 60–68.
 9. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Имитационное моделирование отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов декаметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2016. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/10/text.pdf>.
 10. Орошук И.М., Соловьев М.В., Сучков А.Н. Пространственно-корреляционные свойства искусственных (станционных) радиопомех декаметрового диапазона // Третья научно-практическая конференция «Морские исследования на Дальнем востоке» – Владивосток, Мор. гос. ун-т. Доклады. 2019. – С. 102–109.
 11. Жданов Б.Б. Ионосферно-волновая служба связи / Под ред. М.М. Крылова. – М.: Военное издательство, 1989. – 147 с.
 12. Черенкова, Л.Е. Распространение радиоволн / Л.Е. Черенкова, О.В. Чернышов – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
 13. Зюко А.Г. и др. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
 14. Пашинцев, В.П. Применение теории фазового экрана для разработки модели однокачкового декаметрового канала связи / В.П. Пашинцев, Л.В. Колосов, С.А. Тишкин и др. // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41. – №1. – С.37–52.
 15. Стейн С., Джонс Д. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. – М.: Связь, 1971. – 376 с.
 16. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 598 с.
 17. Хмельницкий Е.А. Оценка помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
 18. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г. Ионозонд-радиопеленгатор с линейной частотной модуляцией сигнала – новый инструмент для исследований ионосферы и распространения радиоволн. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. LVI. – № 5. – С. 287–306.
 19. Финк Л.М., Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Советское радио, 1970. – 728 с.

References

1. Slyusar V. I. Cifrovoe formirovanie luchy v sistemah svyazi: Budushchee rozhdaetsya segodnya [Digital beamforming in communication systems: the future is born today]. / V. I. Slyusar // *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. – 2001. – №1. – С. 6–12.
2. Grigor'ev L.N. Cifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannyh anten-nyhreshetkah [Digital beamforming in phased array antennas] / L. N. Grigor'ev. – М.: Radiotekhnika, 2010. – 144 s
3. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Vozmozhnosti neekvidistantnykh cifrovyykh antennykh reshetok s prostranstvenno-korrelyacionnym metodom obrabotki signalov [Possibilities of non-equidistant digital antenna arrays with a spatial-correlation signal processing method] // 17-ya Mezhdunarodnaya konferenciya «Cifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye». – Moskva, Rossijskoe NTORES im. A.S. Popova. Rossiya. Doklady. 2015. – S. 302–305. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., ZHarikov-Gorskij V.A. Metodika ocenki pomekhoustoichivost idekamentrovyykh radiokanalov poverhnostnoj volny // *Tekhnika radiosvyazi*. – 2017. – № 3 (34). – S. 19–29.
4. Oroschuk I.M., Dolgih V.N., Suchkov A.N. Veroyatnostnye harakteristiki prostranstvenno-korrelyacionnogo metoda obnaruzheniya signalov v dekametrovom diapazone [Probabilistic characteristics of the spatial-correlation method for detecting signals in the decameter range] // *ZHurnal radioelektroniki: elektronnyj zhurnal*. – 2013. – № 12. – Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html>.
5. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. *Acoustical Physics*. 2007(53); 2:190-196. New York (in Engl.).
6. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Mel'nik S.L., Solov'ev M.V. Veroyatnostnaya ocenka obnaruzheniya radiolokacionnogo signala cifrovoj antennoj reshetkoj s prostranstvenno-korrelyacionnym metodom obrabotki signalov [A probabilistic assessment of the detection of a radar signal by a digital antenna array with a spatial-

- correlation signal processing method] // ZHurnal radioelektroniki: elektronnyj zhurnal. – 2019. – № 6. – Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/2/text.pdf>.
7. 7.Oroshchuk I.M., Suchkov A.N. Vozmozhnosti primeneniya nelinejnyh cifrovyyh antennoy reshetok v dekametrovom diapazone [Possibilities of using non-linear digital antenna arrays in the decimeter range] // Vestnik Inzhenernoj shkoly DVFU. – 2015. – № 2. S. 17–26. URL: <http://vestnikis.dvfu.ru/images/2015-2-3.pdf>.
 8. 8.Oroshchuk I.M., Suchkov A.N. ZHarikov-Gorskij V.A. Modelirovanie prostranstvenno-korreljacionnyh harakteristik polya radiosignalov i radiopomekh v cifrovyyh antennoy reshetkah dekametrovyh radioelektronnyh system [Modeling of spatial-correlation characteristics of the field of radio signals and radio noise in digital antenna arrays of decimeter electronic systems] // Radiotekhnicheskij telekommunikacionnyye sistemy. 2017. № 3. – S. 60–68.
 9. 9.Oroshchuk I.M., Suchkov A.N., ZHarikov-Gorskij V.A. Imitacionnoe modelirovanie otklika cifro-vyyh antennoy reshetok s prostranstvenno-korreljacionnym metodom obrabotki signalov dekametrovogo diapazona [Simulation of the response of digital antenna arrays with a spatial-correlation method for decimeter signal processing] // ZHurnal radioelektroniki: elektronnyj zhurnal. – 2016. – № 12. – Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/10/text.pdf>.
 10. 10.Oroshchuk I.M., Solov'ev M.V., Suchkov A.N. Prostranstvenno-korreljacionnye svojstva iskusstvennyh (stacionnyh) radiopomekh dekametrovogo diapazona [Spatial-correlation properties of artificial (station) decimeter radio interference] // Tret'ya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Morskie issledovaniya na Dal'nem vostoke» – Vladivostok, Mor. gos. un-t. Doklady. 2019. – S. 102–109.
 11. 11.Zhdanov B.B. Ionosferno-volnovaya sluzhba svyazi [Ionospheric wave communication service] / Pod red. M.M. Krylova. – M.: Voennoe izdatel'stvo, 1989. – 147 s.
 12. 12.CHerenkova, L.E. Rasprostranenie radiovoln [Radio wave propagation] / L.E. CHerenkova, O.V. CHernyshov – M.: Radio i svyaz', 1984. – 272 s.
 13. 13.Zyuko A.G. i dr. Teoriya peredachi signalov [Signal theory]. – M.: Radio isvyaz', 1986. – 304 s.
 14. 14.Pashincev, V.P. Primenenie teorii fazovogo ekrana dlya razrabotki modeli odnoshchekovogo dekametrovogo kanala svyazi [Application of the theory of a phase screen for the development of a model of a one-jump decimeter communication channel] / V.P. Pashincev, L.V. Kolosov, S.A. Tishkini dr. // Radiotekhnika i elektronika. – 1996. – T. 41. – №1. – S.37–52.
 15. 15.Stejn S., Dzhons D. Principy sovremennoj teorii svyazi i ih primeneniye k peredache diskretnykh soobshchenij [The principles of modern communication theory and their application to the transmission of discrete messages]. – M.: Svyaz', 1971. – 376 s.
 16. 16.Golovin O.V., Prostov S.P. Sistemy i ustrojstva korotkovolnoy svyazi [Systems and devices for short-wave communication]. – M.: Goryachyaliniya –Telekom, 2006. – 598 s.
 17. 17.Hmel'nickij E.A. Ocenka pomekhozashchishchennosti priema signalov v KV diapazone [Evaluation of the noise immunity of receiving signals in the HF band]. – M.: Svyaz', 1975. – 232 s.
 18. 18.Vertogradov G. G., Uryadov V. P., Vertogradova E. G. Ionozond-radiopelengator s linejnoy cha-stotnoj modulyaciej signala – novyj instrument dlya issledovaniy ionosfery i rasprostraneniya radiovoln [Linear frequency-modulated signal direction finder ionoprobe - a new tool for studying the ionosphere and radio wave propagation]. // Izv. vuzov. Radiofizika. 2008. T. LVI. – № 5. – S. 287–306.
 19. Fink L.M., Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij [Discrete Message Theory]. – M.: Sovetskoe radio, 1970. – 728 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Михайлович Орошчук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6 e-mail: Oroshchuk@yandex.ru

Игорь Евгеньевич Гуреев, соискатель, Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: ingvard-12@mail.ru

Андрей Николаевич Сучков, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Михаил Викторович Соловьев, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: ssoloveva@list.ru

Igor M. Oroshchuk, Dr. Sci. (Eng)., Professor, Professor of the Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: Oroshchuk@yandex.ru

Igor E. Gureev, post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: ingvard-12@mail.ru

Andrey N. Suchkov, associate Professor, Ph.D. (Eng)., Director of Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Mikhail V. Soloviev, post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia, e-mail: ssoloveva@list.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.067
УДК 519.876.5

Метод компенсации пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех в цифровых антенных решетках с нелинейным методом обработки сигналов

А.Н. Сучков¹, И.М. Орошук¹, М.В. Соловьев¹, С.Л. Мельник¹

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. Целью работы является обоснование метода компенсации пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех декаметрового диапазона при проектировании конфигураций цифровых антенных решеток с нелинейным методом обработки сигналов. Направленные свойства и помехоустойчивость рассматриваемых антенных решеток для телекоммуникационных и радиолокационных радиоэлектронных систем в значительной степени зависят от сформированного у антенной решетки пространственно-корреляционного поля радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона, которое синтезируются для заданной частоты и полосы пропускания на основе детерминированной зависимости поля радиосигналов и стохастической имитационной модели синтеза радиопомех.

С учетом реальных характеристик пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех декаметрового диапазона предложен метод его полной компенсации, основанный на предложенном способе расположения элементов антенной решетки. Использование данного метода позволит повысить направленные свойства и помехоустойчивость цифровых антенных решеток с нелинейным методом обработки сигналов для телекоммуникационных и радиолокационных систем.

Ключевые слова: цифровые антенные решетки, пространственно-корреляционный метод обработки сигналов, направленные свойства, помехоустойчивость, имитационные модели, синтез, позиционирование, рандомизация, компенсация пространственно-корреляционного поля радиопомех

Method of compensation of spatial correlation field of natural radio interference in digital antenna arrays with nonlinear signal processing

Andrey N. Suchkov¹, Igor M. Oroshuck¹, Mikhail V. Soloviev¹ Sergei L. Melnik¹

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. The aim of the work is to substantiate the method of compensation of the spatial correlation field of natural radio interference of the decimeter range in the design of configurations of digital antenna arrays with a nonlinear signal processing method. To properties and noise immunity of the considered antenna arrays for lecommunication and radar electronic systems largely depend on the formed antenna array spatial correlation fields of radio and radio decimeter range are synthesized for a given frequency and a bandwidth based on determined based on field radiosignal-fishing and stochastic simulation model of the synthesis of interference.

Taking into account the real characteristics of the spatial correlation field of natural radio interference of the decimeter range, a method of its full compensation based on the proposed method of arrangement of the antenna array elements is proposed. Using this method.

Keywords: digital antenna arrays, spatial correlation method of signal processing, directional properties, noise immunity, simulation models, synthesis, positioning, randomization, compensation of spatial correlation field of radio interference

Введение

Внедрение в современные радиоэлектронные средства (РЭС) цифровых антенных решеток (ЦАР) позволяет рассмотреть перспективы использования нелинейных методов обработки сигналов и неэквидистантного варианта построения их конфигураций, которые, согласно исследованиям ряда отечественных и зарубежных ученых, позволяют улучшить направленные характеристики антенных систем РЭС, снизить уровень их боковых лепестков при меньшем числе элементов по сравнению с классическими антенными решетками (АР) [1-4].

Предварительный анализ показал, что применение пространственно-корреляционного метода обработки сигналов в ЦАР декаметрового диапазона, как разновидности нелинейной обработки, даст возможность улучшить направленные характеристики РЭС при малых отношениях уровней сигнал/шум ≤ 1 , что определяет актуальность их исследования [5].

Пространственно-корреляционный метод обработки сигналов

Суть пространственно-корреляционного метода обработки сигналов сводится к определению функций взаимной корреляции сигналов на выходе всех пар элементов АР с последующим суммированием и принятием решения об обнаружении сигнала в пороговом устройстве [5].

Выходное напряжение такой ЦАР может быть представлена в следующем виде

$$U_{\text{вых.ЦАР}} = \frac{2}{K} \sum_{i>j}^{l-1} \sum_{k=0}^{K-1} z_i(k)z_j(k), \quad i = \overline{0, l-1}; j = \overline{0, l-1}, \quad (1)$$

где: – $z_i(k)$, $z_j(k)$ – соответствующие отсчеты напряжений аддитивной смеси радиосигналов $s_i(k)$, $s_j(k)$ и радиопомех $n_i(k)$, $n_j(k)$ на выходах трактов обработки i -го и j -го элементов АР, $z_i(k) = s_i(k) + n_i(k)$, $z_j(k) = s_j(k) + n_j(k)$;

– K – объем выборки (число отсчетов) обрабатываемых в ЦАР; l – число элементов в АР.

Выражение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\text{Вых.ЦАР}} = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j>i}^{I-1} \left[\sigma_{s,i} \sigma_{s,j} \rho_{s,ij} (\tau - \tau_k) + \sigma_{n,i} \sigma_{n,j} \rho_{n,ij} (\tau - \tau_k) \right], \quad (2)$$

где $\sigma_{s,i}, \sigma_{s,j}, \sigma_{n,i}, \sigma_{n,j}$ – среднеквадратические отклонения (СКО) напряжений радиосигналов и радиопомех на выходах i -х и j -х элементов АР; $\rho_{s,ij}(\tau - \tau_k), \rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)$ – коэффициенты взаимной корреляции (КВК) напряжений радиосигналов и радиопомех на выходах i -х и j -х элементов АР; τ_k, τ – компенсационные и естественные временные задержки радиосигналов, определяемые вводимой задержкой и разностью времени распространения радиосигнала до элементов АР.

Решение о наличии или отсутствии полезного сигнала принимается на основе сравнения итогового выходного напряжения с пороговым U_0 , определяемым вероятностными характеристиками сигнала.

Помехоустойчивость таких ЦАР определяется типом и назначением РЭС.

Так для телекоммуникационной системы на основе ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов при использовании гауссовой амплитудной модуляции помехоустойчивость определяется битовой вероятностью ошибки (BER) приема сообщений [6]

$$\overline{BER} \approx \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left[\frac{\sqrt{KB} \left(q_0^2 - \frac{2}{B} \sum_{i<j} \rho_{n,ij} \right)}{\sqrt{1 + \frac{2}{B} \sum_{i<j} \rho_{n,ij}^2}} \right] \right) + \Phi \left[\frac{\sqrt{KB} \left(q_0^2 - \frac{2}{B} \sum_{i<j} (q^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij}) \right)}{\sqrt{(q^2 + 1)^2 + \frac{2}{B} \sum_{i<j} (q^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij})^2}} \right], \quad (3)$$

где $\Phi(z)$ – интеграл вероятности; q_0^2 – относительный пороговый уровень, $q_0^2 = \frac{U_0}{2\sigma_n^2}$;

q^2 – отношение спектральных плотностей мощности радиосигнала и естественной радиопомехи; B – количество корреляторов, $B = I^2 - I$.

Вероятностные характеристики обнаружения сигнала для радиолокационных ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов определяется выражением [7-9]

$$P_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\operatorname{erf}^{-1} \left[1 - 2P_{\text{лт}} \right] \sqrt{\frac{K}{2} + \sum_{i \leq j} \rho_{n,ij}^2} - \sqrt{K} q^2 \sum_{i \leq j} \rho_{s,ij}}}{\sqrt{\frac{B}{2} (q^2 + 1)^2 + \sum_{i \leq j} (q^2 \rho_{s,ij} + \rho_{n,ij})^2}} \right] \right), \quad (4)$$

где $\operatorname{erf}(\cdot)$ – интеграл вероятностей; $P_{\text{лт}}$ – вероятность ложной тревоги.

Направленные свойства ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов зависят от направленных характеристик отдельных элементов АР и ее всей апертуры, которые очевидно

зависят от корреляционных свойств радиосигналов между всеми парами элементов АР и определяются выражением (1).

Анализ выражений (1–4) и дополнительные исследования показали, что характеристики ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов в значительной будут зависеть от пространственно-корреляционных свойств поля радиосигналов $\rho_{s,ij}$ и радиопомех $\rho_{n,ij}$ декаметрового диапазона. Поэтому для достижения лучшей эффективности ЦАР с нелинейным методом обработки сигналов необходимо учитывать данные свойства при построении конфигураций АР.

Имитационные модели пространственно-корреляционного поля радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона

В основу численного моделирования характеристик ЦАР положены имитационные модели позволяющие адекватно синтезировать пространственно-корреляционное поле радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона.

Имитационные модели были получены на основе статистической обработки экспериментальных данных [10].

Для радиосигналов получена детерминированная имитационная модель, отражающая общий характер изменения пространственно-корреляционной связи радиосигналов в декаметровом диапазоне для заданного разнеса между антеннами d с погрешностью не более 3,5 % [11]:

$$\rho_s(d, f_0) = e^{-d(5,28 \cdot 10^{-3} \cdot f_0 + 0,138)}, \quad (5)$$

где d – расстояние между элементами АР, км; f_0 – частота сигнала, МГц.

Величина ρ_n имеет иную тенденцию. Большие значения КВК естественных радиопомех сохраняются только в пределах небольшого интервала корреляции d_0 , а затем при увеличении разнеса между антеннами $d > d_0 \approx \lambda/2$ резко снижаются и осциллируют по гауссовому закону $N(\rho_n, \sigma_{\rho,n})$ в небольших пределах.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена стохастическая имитационная модель, позволяющая адекватно синтезировать пространственно-корреляционные характеристики поля естественных радиопомех декаметрового диапазона [12]:

$$\rho_n(d) = \begin{cases} \sin(\pi d/d_0)/(\pi d/d_0), & 0 \leq d \leq d_0 \\ F^{-1}(\sigma_{\rho,n}), & d > d_0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$f_0 \in (3; 20 \text{ МГц}), \rho_n \in (-1, 1)$$

где $F^{-1}(\sigma_{\rho,n})$ – обратная интегральная функция усеченного гауссового распределения; $\sigma_{\rho,n}$ – среднеквадратическое отклонение КВК естественных радиопомех.

Как видно из выражения (6) в пределах небольшого участка пространственного интервала корреляции $0 \leq d \leq d_0$, моделирование реализации КВК естественных радиопомех осуществляется по детерминированному закону. Далее при увеличении пространственного разнота ($d > d_0$) зависимость $\rho_n(d)$ носит случайный характер и ее реализации моделируются стохастическим изменением величины интегральной функции F усеченного гауссового распределения по равномерному закону – $F \in (0,1)$.

Дополнительно была определена зависимость амплитуды флуктуационной составляющей КВК естественных радиопомех от средней частоты f_0 и полосы пропускания Δf приемных трактов, для которой получено аппроксимирующее эмпирическое выражение:

$$\sigma_{p,n}(f_0, \Delta f) = 7,2 \cdot 10^{-3} f_0 + 1,3 \cdot 10^{-4} \Delta f + 0,118, \quad (7)$$

где f_0 – частота сигнала, МГц; Δf – полоса

пропускания трактов обработки сигналов, кГц.

Моделирование пространственного-корреляционного поля радиосигналов и радиопомех декаметрового диапазона сканирующей ЦАР

На основе полученных моделей пространственно-корреляционной зависимости поля радиосигналов (5) и стохастической имитационной модели пространственно-корреляционных характеристик поля естественных радиопомех декаметрового диапазона (см. формулы 6 и 7) существует возможность численного моделирования значений КВК радиосигналов и естественных радиопомех сформированного на входах элементов АР.

Сущность методики моделирования пространственного-корреляционного поля радиосигналов и радиопомех заключается в следующем [14].

Первоначально для заданной частоты сигнала и полосы пропускания трактов обработки системы синтезируются пространственно-корреляционные зависимости поля радиосигналов и естественных радиопомех декаметрового диапазона (рис. 1).

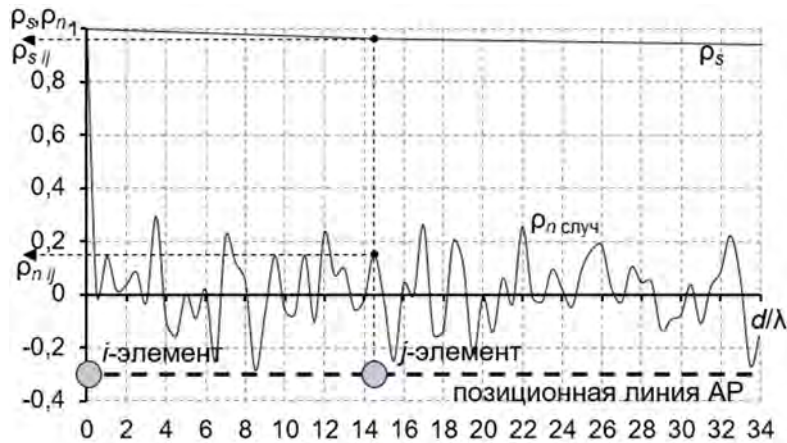


Рис. 1. Пространственно-корреляционные характеристики поля радиосигналов и естественных радиопомех

Далее в зависимости от конфигурации АР определяется матрица взаимных расстояний между ее элементами после их позиционирования (рисунок 2) в направлении прихода сигнала θ_s :

$$\|d_{ij}(\theta_s)\| = \begin{pmatrix} 0 & d_{01} & d_{02} & \dots & d_{0(l-1)} \\ & 0 & d_{12} & \dots & d_{1(l-1)} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & d_{(l-2)(l-1)} \\ & & & & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

На основе полученной матрицы $\|d_{ij}(\theta_s)\|$, после наложения расстояний на зависимости КВК радиосигналов и естественных радиопомех определяются матрицы взаимных корреляций радиосигналов $\|\rho_{s,ij}(\theta_s)\|$ и радиопомех $\|\rho_{n,ij}\|$ (рисунок 1).

По результатам вычисления соответствующих сумм КВК из полученных матриц [см. формулы (9) и (10)], с помощью выражений (2), (3) и (4) производится

оценка направленных свойств и помехоустойчивости ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов для телекоммуникационных и радиолокационных РЭС при различных значениях отношений уровней радиосигнала к естественной радиопомехе на входах элементов АР и объема выборки сигнала.

$$\|\rho_{s,ij}(\theta_s)\| = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{s,01} & \rho_{s,02} & \dots & \rho_{s,0(l-1)} \\ & 1 & \rho_{s,12} & \dots & \rho_{s,1(l-1)} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & \rho_{s,(l-2)(l-1)} \\ & & & & 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\|\rho_{n,ij}\| = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{n,01} & \rho_{n,02} & \dots & \rho_{n,0(l-1)} \\ & 1 & \rho_{n,12} & \dots & \rho_{n,1(l-1)} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & \rho_{n,(l-2)(l-1)} \\ & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

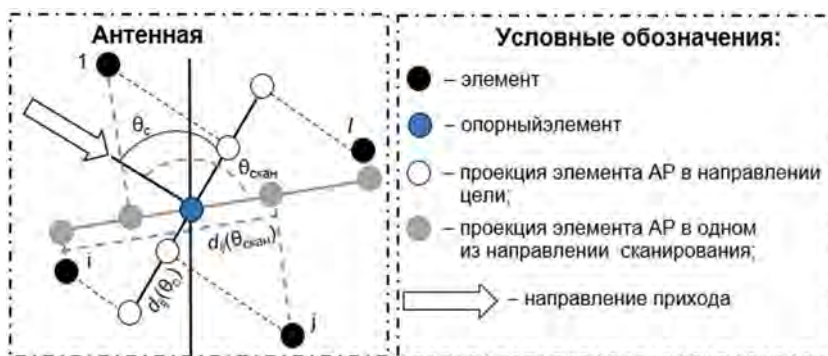


Рис. 2. Позиционирование элементов AP в направлении прихода радиосигнала θ_s для угла сканирования $\theta_{скан}$

Метод компенсации влияния пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех декаметрового диапазона в ЦАР с нелинейным методом обработки сигналов

С учетом реальных характеристик пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех декаметрового диапазона (см. рисунок 1) разработан метод их компенсации при формировании выходных характеристик ЦАР. Суть метода заключается в неэквидистантном способе размещения антенных элементов ЦАР, которые рандомизируют корреляционное поле радиопомех и расположены на расстояниях друг от друга превышающее средний период колебаний КВК радиопомех, равным или превышающем пространственный интервал корреляции радиопомех d_0 на осциллирующем участке этой зависимости (рисунок 3).

При таком размещении элементов вычисленные мгновенные значения КВК радиопомех за счет осциллирующей зависимости будут принимать разнознаковые значения (см. рисунок 3), после суммирования которых результирующая сумма естественных радиопомех с ростом числа элементов будет стремиться к нулю. Напротив, в силу ортогонального позиционирования элементов AP к направлению прихода сигнала значения КВК радиосигнала будут всегда положительны и принимать наибольшие значения при разносе, в результате чего их сумма с ростом числа элементов будет возрастать.

Таким образом, с ростом числа элементов в AP при заданных условиях их разноса отношение уровня сигнал/шум на выходе тракта обработки сигналов [см. выражения (2), (3) и (4)] будет возрастать, тем самым будут улучшаться направленные свойства [см. выражение (2)] и повышаться помехоустойчивость ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов [см. выражения (3) и (4)].

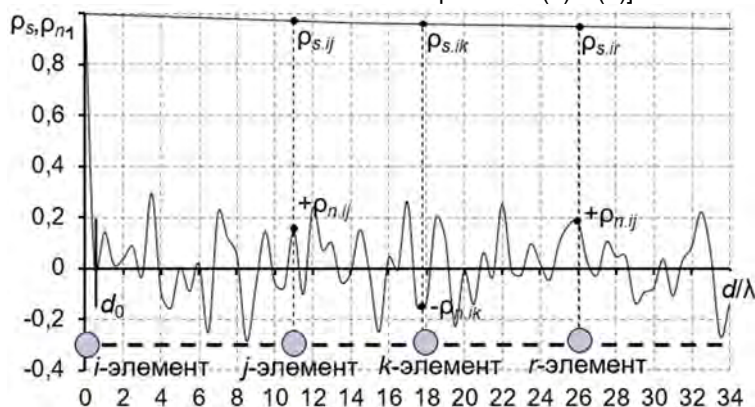


Рис. 3. К пояснению принципа компенсации влияния естественных радиопомех

В качестве примера на рисунке 4 показана зависимость средней битовой вероятности ошибки приема сигнала [см. выражение (3)] от относительного порога принятия решений приемника q_0^2 при различном числе элементов в AP [6].

На рисунке 5 показан пример полученной вероятности пропуска цели [см. выражение (4)] от отношения уровней радиосигнала к радиопомехе на входе радиолокационной ЦАР для различных значений вероятности ложной тревоги [9].

Заключение

Таким образом, предложенный метод компенсации пространственно-корреляционного поля естественных радиопомех в цифровых антенных решетках с нелинейным методом обработки сигналов, основанный на неэквидистантном способе размещения антенных элементов, которые расположены на расстояния друг от друга превышающее средний период колебаний КВК радиопомех на осциллирующей части зависимости.

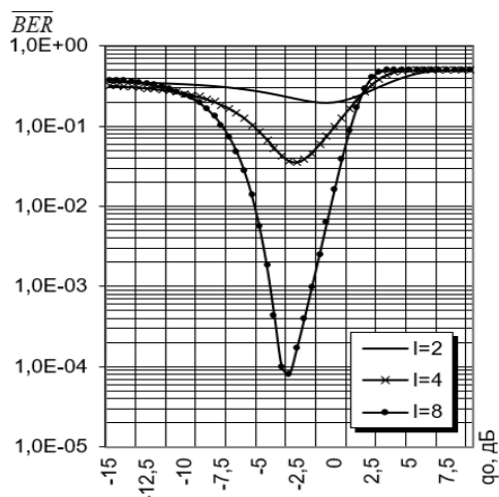


Рис. 4. Зависимость средней битовой вероятности ошибки приема элемента сигнала от значения относительного порога принятия решения приемника q_0^2 для различного числа элементов АР при отношении уровней сигнал/шум на входе ее элементов $q = 3$ дБ и базе сигнала $N=2$

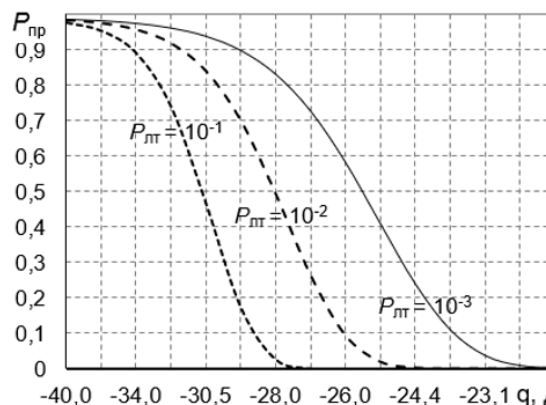


Рис. 5. Оценка помехоустойчивости 16-элементной радиолокационной ЦАР при трех различных значениях вероятности ложной тревоги

В результате происходит полная компенсация корреляционной зависимости радиопомех в выходных характеристиках.

Как видно по графикам (рис. 4 и 5) РЭС на основе ЦАР с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов обладают потенциально повышенной помехоустойчивостью, что определяет перспективность данного направления исследований.

Литература

1. Хансер Р.К. Сканирующие антенные системы. М.: Советское радио, 1966.
2. Бенесон Л.С. Антенные решетки. – М.: Советское радио, 1966. – 367 с.
3. Y. Tang, B. Jiang, T. Zhou and T. Mao. Multi-resolution composite array based radar with adaptive beamforming. IET International Radar Conference 2015, 14-16 Oct. 2015, pp. 1-4.
4. L.C. Stange, C. Metz, E. Lissel and A.F. Jacob. Multiplicatively processed antenna arrays for DBF radar applications. IEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, 2002. Volume 149, Issue 2, pp. 106-112.
5. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Возможности неэквидистантных цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2015. – С. 302–305.
6. Орошук И.М., Долгих В.Н., Сучков А.Н. Вероятностные характеристики пространственно-корреляционного метода обнаружения сигналов в декаметровом диапазоне // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2013. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html>.
7. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. Acoustical Physics. 2007(53); 2:190-196. New York (in Engl.).
8. Орошук И.М., Сучков А.Н., Мельник С.Л., Соловьев М.В. Вероятностная оценка обнаружения радиолокационного сигнала цифровой антенной решеткой с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2019. – № 6. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/2/text.pdf>.
9. Долгих В.Н., Орошук И.М., Сучков А.Н. Пространственно-корреляционные свойства сигналов и помех декаметрового диапазона. Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова», 2013.
10. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Пространственно-корреляционные свойства радиосигналов декаметровых волн // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 34–39.
11. Орошук И.М., Сучков А.Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2015. – № 2. С. 17–26. URL: <http://vestnikis.dvfu.ru/images/2015-2-3.pdf>.
12. Орошук И.М., Сучков А.Н. Жариков-Горский В.А. Моделирование пространственно-корреляционных характеристик поля радиосигналов и радиопомех в цифровых антенных решетках декаметровых радиозлектронных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 3. – С. 60–68.
13. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Имитационное моделирование отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов декаметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2016. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec16/10/text.pdf>.

References

1. Hanser R.K. Skaniruyuschie antennoye sistemy [Scanning antenna systems]. Moscow, Sovetskoe radio. 1966. 496 p.
2. Beneson L.S. Antennie reshetki [Antenna array]. – M. – Sovetskoe radio. – 1966. – 367 p.
3. Y. Tang, B. Jiang, T. Zhou and T. Mao. Multi-resolution composite array based radar with adaptive beamforming. IET International Radar Conference 2015, 14-16 Oct. 2015, pp. 1-4.
4. L.C. Stange, C. Metz, E. Lissel and A.F. Jacob. Multiplicatively processed antenna arrays for DBF radar applications. IEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, 2002. Volume 149, Issue 2, pp. 106-112.
5. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Vozmozhnosti neekvidistantnykh tsifrovyykh antennoykh reshetok s prostranstvenno-korrelatsionnym metodom obrabotki signalov [Opportunities netvigilance digital antenna arrays with spatial-correlation method for signal processing]. 17-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye». Moskva, Rossiyskoe NTORES im. A.S. Popova. Rossiya. Doklady. 2015. p. 302–305.
6. Oroschuk I.M., Dolgikh V.N., Suchkov A.N. Veroyatnostnie harakteristiki prostranstvenno_korrelatsionnogo metoda obnaruzheniya signalov v dekametrovom diapazone [Spatial correlation method probabilistic characteristic of signal acquisition in decameter range]. Zhurnal Radioelektroniki [elektronnyy zhurnal], 2013, No.12.
7. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. Acoustical Physics. 2007(53); 2:190-196. New York (in Engl.).
8. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Melnik S.L., Solovev M.V. Veroyatnostnaya ocenka obnaruzheniya radiolokatsionnogo signala cifrovoi antennoy reshetkoi s prostranstvenno-korrelatsionnim metodom obrabotki signalov [Probabilistic estimation of radar signal detection by digital antenna array with spatial correlation method of signal processing]. Zhurnal radioelektroniki [elektronnyy zhurnal], 2019, №6.
9. Dolgikh V.N. Prostranstvenno-korrelatsionnyye svoystva signalov i pomekh dekametrovogo diapazona. [The decameter range spatially-correlation characteristics of signals and interferences]. Vladivostok, The branch of NAVY Academy named after N.G. Kuznetsov Publ. 2013. 112 p. (In Russian)
10. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Prostranstvenno-korrelatsionnye svoystva radiosignalov dekametrovyykh voln [The spatially-correlation dependences of radio signals decametric radio waves]. Elektrosvyaz, 2015, No. 7, pp. 34-39.
11. Oroschuk I.M., Suchkov A.N. Vozmozhnosti primeneniya nelineinyykh cifrovyykh antennoykh reshetok v dekametrovom diapazone [The possible application of nonlinear digital antenna arrays in decametre range]. Vestnik Inzhenernoy shkoly DVFU [elektronnyy zhurnal], 2015, No. 2, pp. 17-26.
12. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorskiy V.A. Modelirovaniye prostranstvenno-korrelatsionnykh harakteristik polya radiosignalov i radiopomekh v cifrovyykh antennoykh reshetkakh dekametrovyykh radioelektronnykh sistem [The simulation of spatially-correlation characteristics of radiosignals and radiointerferences field in the decameter range radioelectronic systems based on the digital antenna arrays]. Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnyye sistemy, 2017, No 3, pp. 60-68.
13. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorskiy V.A. Imitatsionnoye modelirovaniye otklika tsifrovyykh antennoykh reshetok s prostranstvenno-korrelatsionnym metodom obrabotki signalov dekametrovogo diapazona [Simulation of the response of digital antenna arrays with spatial correlation method of decameter range signal processing]. Zhurnal radioelektroniki [elektronnyy zhurnal], 2016, №12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Николаевич Сучков, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Игорь Михайлович Орошук, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: Oroschuk@yandex.ru

Михаил Викторович Соловьев, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: ssoloveva@list.ru

Сергей Леонидович Мельник, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: navy1982@rambler.ru

Andrey N. Suchkov, Ph.D. (Eng), associate Professor, Director of the Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Igor M. Oroschuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: Oroschuk@yandex.ru

Mikhail V. Soloviev, Post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: ssoloveva@list.ru

Sergei L. Melnik, Post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: navy1982@rambler.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.071

УДК 621.39(031), 621.391.8

Способ компенсации интерференционного поля стационарных радиопомех в коротковолновых широкополосных каналах радиосвязи

И.М. Орошук¹, М.В. Соловьев¹, А.Н. Сучков¹, А.А. Гаврилов¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-корреляционных свойств узкополосных стационарных помех коротковолнового диапазона. По результатам обработки экспериментальных данных получены обобщающие закономерности пространственно-корреляционных свойств интерференционного поля узкополосных стационарных помех, определяющие возможность компенсации их влияния при обработке широкополосных сигналов в коротковолновых каналах радиосвязи, использующих цифровые антенные решетки с пространственно-корреляционной обработкой сигналов. С учетом возможностей компенсации интерференционного поля узкополосных стационарных помех, исследована возможность повышения помехоустойчивости и скорости передачи информации в ионосферных каналах радиосвязи за счет передачи широкополосных сигналов с применением OFDM модуляции, более адаптируемой к условиям дисперсионных искажений и временного рассеяния сигналов, возникающих при распространении коротких волн. Результаты моделирования показали потенциальную возможность обеспечения повышенной скорости передачи информации в коротковолновых каналах с пространственно-корреляционной обработкой сигналов с заданной помехоустойчивостью при малых отношениях уровней сигнал/шум в точке приема, обеспечиваемой при меньших ограничениях выбора рабочей частоты, по сравнению с возможностями новых разработок скоростных коротковолновых модемов, в условиях ограниченности частотного ресурса коротковолнового диапазона из-за большой загруженности работой территориально-разнесенных станций.

Ключевые слова: короткие волны, канал радиосвязи, цифровая антенная решетка, пространственно-корреляционная обработка сигнала, стационарные радиопомехи, помехоустойчивость, скорость передачи информации.

The compensation method of the interference field of stationary radio interferences in short wave broadband radio channels

Igor M. Oroshchuk¹, Mikhail V. Soloviev¹, Andrey N. Suchkov¹, Aleksey A. Gavrilov¹¹Higher Pacific Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. The experimental studies results of the spatial-correlation properties of narrow-band short-wave station interference are presents. Based on the results of processing the experimental data generalizing regularities of the interference field spatial-correlation properties of narrow-band station noise have been obtained. These regularities determine the possibility of compensating for their influence during processing broadband signals in radio channels using digital antenna arrays with spatial-correlation signal processing. Taking into account the possibilities of compensating for the interference field of narrow-band noise, the possibility of increasing the information transfer rate by transmitting wide-band signals using modulation with OFDM, which is more adaptable to the conditions of dispersion distortion and temporal dispersion of signals arising from the propagation of short waves in ionospheric communication channels, has been studied. The simulation results showed the potential for providing an increased information transfer rate in short-wave radio channels with spatial-correlation signal processing with a given noise immunity at low signal-to-noise levels at the receiving point, provided with less restrictions on the choice of operating frequency, compared with the capabilities of new developments of high-speed HF modems, in conditions of limited frequency resource of the HF band due to the heavy workload of geographically dispersed stations.

Key words: short waves, radio communication channel, digital antenna array, spatially-correlation signal processing, station radio interferences, interference immunity, data transfer speed.

Введение

Особенности дальнего распространения коротких волн (КВ) способствуют их широкому применению, благодаря которым КВ радиосвязь остается важным элементом в системах дальней связи с судами в акваториях Мирового океана и в других отраслях.

Востребованность КВ радиосвязи определяется возможностью оперативного установления прямой радиосвязи на различные расстояния, вплоть до глобальных, при низких экономических и энергетических затратах.

Однако при всех достоинствах в системах КВ радиосвязи существуют ряд недостатков: зависимость качества связи от изменений состояния ионосферы; многолучевое распространение радиоволн, свойственное для ионосферной

радиосвязи, вызывающее замирания и временное рассеяние сигнала; влияние множества различных видов радиопомех, особенно стационарных, возникающих на загруженных частотных участках спектра КВ диапазона; ограниченность скорости передачи данных, вызванной многолучевостью распространения радиоволн [1, 2].

С учетом всех достоинств КВ радиосвязи, несмотря на указанные недостатки в настоящее время проводятся исследования новых возможностей применения КВ каналов радиосвязи.

В условиях возросших требований к информативности обмена данными между корреспондентами в пределах акваторий Мирового океана, остро стоит задача повышения скорости передачи информации. Для решения таких задач в

ведущих отечественных и зарубежных научных организациях активно ведутся разработки новых скоростных КВ радиолиний. Эти разработки направлены на повышение скорости передачи информации в КВ каналах радиосвязи за счёт использования высокоскоростных модемов с квадратурно-амплитудной модуляцией сигнала (КАМ) [3, 4], а также за счёт применения OFDM-модемов, построенных на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency-division multiplexing) [3, 5].

В современных разработках использование КАМ - 64 модемов позволяет обеспечивать на однокачковых ионосферных радиотрассах скорость передачи информации в полосе 3,1 кГц до 9,6 кбит/с, а в полосе 40 кГц – до 57 кбит/с [4]. Однако для достижения приведенных скоростей в ионосферных каналах радиосвязи, существует проблема их обеспечения, связанная с глубокими интерференционными замираниями. Это существенно ограничивает возможности применения таких модемов. Данный вид модуляции может быть эффективно использован только на максимально применимой частоте (МПЧ) или на частотах близких к ней, обеспечивающих минимальные замирания при однолучевом распространении радиоволн [2]. Однако практическое использование МПЧ не всегда возможно из-за сложности точного прогнозирования и ограничений при выборе требуемых рабочих частот в реальной помеховой обстановке. В связи с этим возникает необходимость использования более низких рабочих частот, на которых в силу многолучевости воздействуют мультипликативные помехи, существенно снижающие помехоустойчивость КАМ-64 модемов, прежде всего за счёт случайной флуктуации фазы принимаемого сигнала. Кроме того, в силу большой ограниченности доступного частотного ресурса в КВ диапазоне существует проблема передачи широкополосных сигналов с полосой более 40 кГц.

В разработанных КВ радиолиниях, построенных на основе OFDM-модемов, работающих в полосе 3,1 кГц в ионосферных радиотрассах достигается скорость передачи информации до 9,6 кбит/с [4]. Данный способ модуляции обеспечивает достаточно высокую помехоустойчивость, в том числе для многолучевых ионосферных каналов связи, за счёт пониженной скорости символьной модуляции на каждой поднесущей частоте. В этом случае снижается влияние фазовых мультипликативных помех и временного рассеяния сигнала [6].

Для увеличения скорости работы OFDM - модемов при сохранении требуемой помехоустойчивости ионосферных каналов также, как и для КАМ, необходимо расширение спектра сигнала, который ограничен частотной загруженностью КВ диапазона.

Проблема передачи широкополосных сигналов в загруженном КВ диапазоне может быть решена путем применения цифровых антенных решеток (ЦАР) с пространственно-корреляционной обработкой сигнала, которая позволяет принимать информацию с достаточной помехоустойчивостью [7-9], в том числе и в поле станционных помех.

Цифровая антенная решетка с пространственной корреляционной обработкой сигнала способна принимать и обрабатывать всю информацию, содержащуюся в структуре пространственно-временного электромагнитного поля в месте приема и при минимальном уровне полезного сигнала извлекать данные в сложной сигнально-помеховой обстановке. При этом принцип построения ЦАР определяется пространственно-корреляционными свойствами сигналов и помех.

В состав ЦАР входят: антенная решетка (АР); блок усиления (БУ); многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП); вычислительное устройство (ВУ), которое состоит из блока временных задержек (БВЗ), блока полосовой фильтрации (БФ), блока корреляционной обработки (БКО), блока суммирования (БС) и устройства принятия решения (УПР) (рис. 1).

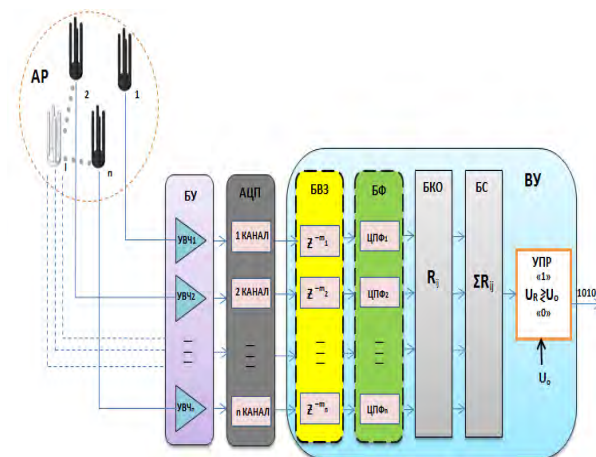


Рис. 1. Функциональная схема приемного тракта обработки ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигнала

Принцип работы ЦАР и форма ее апертуры определяется пространственно-корреляционными свойствами сигналов и помех. Для обеспечения эффективной компенсации помех были определены наиболее оптимальные с точки зрения помехоустойчивости и компактности формы апертуры в виде кольца или спирали [10].

Принцип работы ЦАР основан на виртуальном позиционировании антенных элементов, разнесенных на разные расстояния ортогонально направлению корреспондента, за счёт ввода временных задержек (рис. 2).

Такое позиционирование обеспечивает возможность когерентного приема. В дальнейшем осуществляется корреляционная обработка между всеми парами элементов антенной решетки с последующим суммированием вычисленных значений взаимной корреляции. После этого выполняется сравнение полученного отклика с пороговым напряжением, определяемым параметрами антенной решетки. В результате на выходе приемного тракта формируется битовая последовательность принимаемого цифрового сигнала (см. рис. 1).

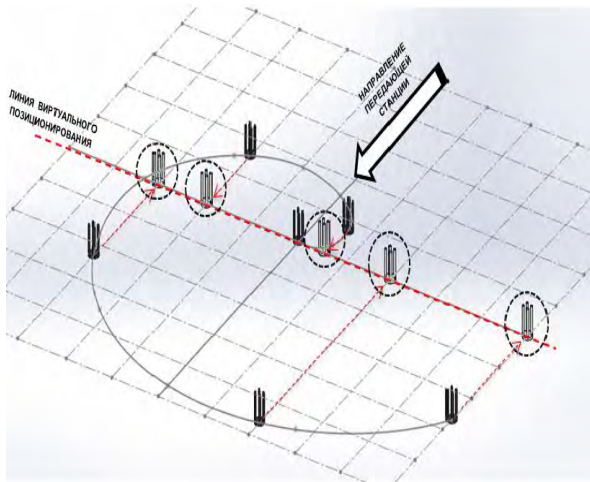


Рис. 2. Виртуальное позиционирование ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов

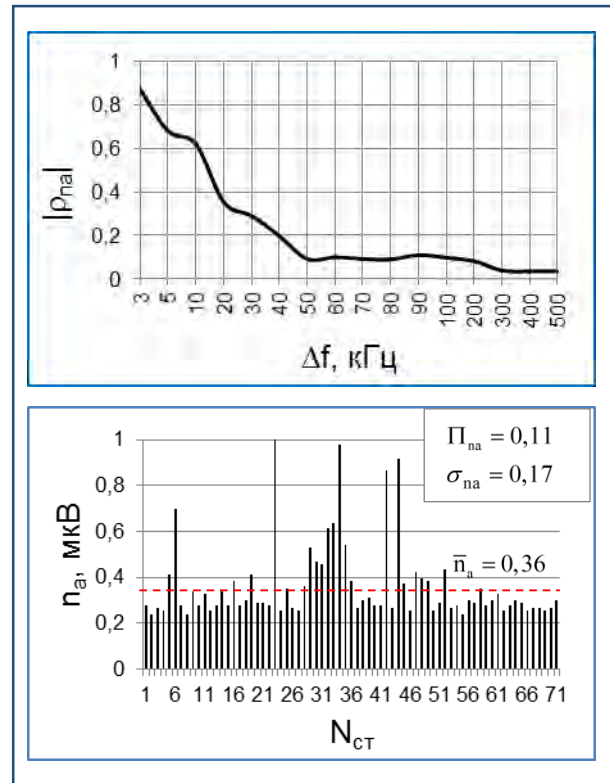
Для оценки возможности передачи сигналов на фоне стационарных помех были проведены экспериментальные исследования зависимости пространственно-корреляционных свойств стационарных помех КВдиапазона от ширины полосы пропускания приемного тракта.

Экспериментальные данные представляли собой оцифрованные синхронные записи пространственно-разнесенных сигналов на расстояниях от 20 до 500 метров. Обработка проводилась в трех поддиапазонах частот (3 – 9 МГц, 9 – 14 МГц и 14 – 20 МГц).

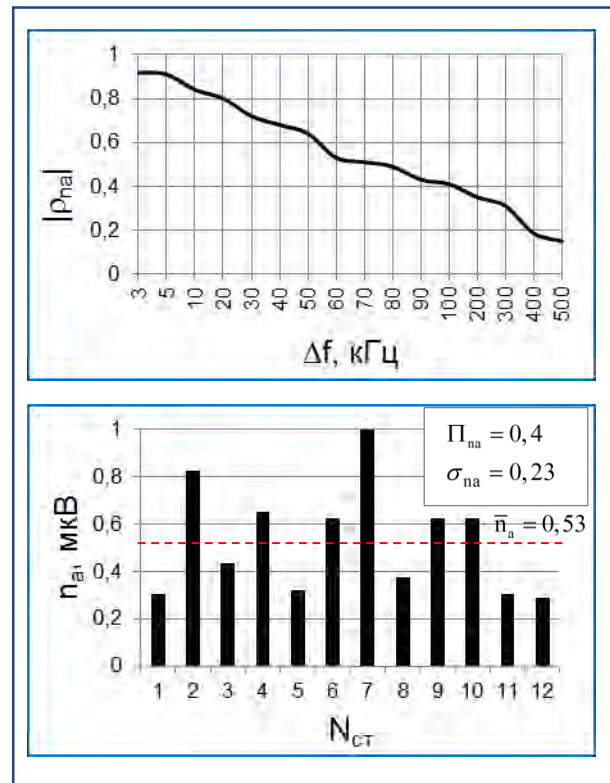
После записи сигналов на ЭВМ производилась оценка пространственной корреляции интерференционного поля стационарных радиопомех при различных полосах пропускания приемного тракта для пространственных разнесах антенных элементов от 20 до 500 метров.

На основе анализа результатов обработки получены зависимости модуля коэффициента взаимной корреляции (КВК) стационарных помех – $|\rho_{na}|$ от полосы пропускания приемного тракта – Δf , анализ которых показал, что с увеличением полосы пропускания КВК снижается (рис. 3).

Анализ зависимостей $|\rho_{na}(\Delta f)|$ показал (см. рис. 3), что с ростом средней частоты сигнала наблюдается тенденция уменьшения крутизны спада КВК при увеличении полосы пропускания приемника, что связано с уменьшением относительной ширины спектра сигнала $\Delta f/f_c$. Кроме того, замечено смещение асимптоты спада КВК от неравномерности спектра уровней и числа стационарных помех $N_{ст}$ в исследуемой полосе пропускания приемника. Определено, что положение асимптоты (см. рис. 3) определяется неравномерностью уровней стационарных помех выраженной через нормированный пик-фактор спектра:



(а)



(б)

Рис. 3. Результаты исследований пространственно-корреляционных свойств стационарных помех, при разнесе антенных элементов на 500 метров:

(а) в диапазоне частот 3-9 МГц;
(б) в диапазоне частот 14-20 МГц

$$P_{na} = \frac{n_{a,max}^2}{\bar{n}_a N_{cr}} \tag{1}$$

где $n_{a,max}, \bar{n}_a$ – максимальный и средний уровни стационарных помех в пределах полосы приемника.

Замечено, что при большей неравномерности спектра асимптота проходит на более высоком уровне относительно оси абсцисс. В результате чего с ростом полосы пропускания при большей неравномерности спектра стационарных помех минимальное значение КВК будет возрастать (см. рис. 3). В этом случае при расширении полосы пропускания невозможно достигнуть значений КВК помех меньше высоты асимптоты, что ограничивает возможность достижения требуемой помехоустойчивости каналов радиосвязи в этих поддиапазонах.

Из проведенного анализа следует, что существует потенциальная возможность передачи широкополосных сигналов на фоне стационарных помех, позволяющих передавать информацию с повышенной скоростью. Однако с другой стороны существуют ограничения скорости передачи информации, связанные с временным рассеянием принимаемого сигнала $\Delta\tau_p$, вызванным многолучевостью ионосферного канала [2], а также с дисперсионными искажениями в ионосфере [4]

Временное рассеяние в ионосферных каналах составляет $\Delta\tau_p \approx 0,3 \div 1$ мс [1,2], что ограничивает минимальную длительность элементарной посылки сигнала допустимыми краевыми искажениями, которые могут вызвать межсимвольную интерференцию в информационном сигнале [6].

Дисперсионные искажения также ограничивают минимальную длительность элементарной посылки сигнала, которая определяется допустимой рассинхронизацией на краях полосы пропускания. В соответствии с [1] максимальное время расхождения сигналов по времени зависит от ширины полосы пропускания приемного тракта и средней частоты f_0 :

$$\Delta\tau_d \approx 80,8 \cdot 10^9 \frac{\Delta f}{f_0^3 \sin \Delta} \tag{2}$$

где Δ – угол места падающего и отраженного от ионосферы луча, зависящий от протяженности трассы.

С учетом рассмотренных ограничений при использовании OFDM-модема [3], допустив краевые искажения и рассинхронизацию сигналов на крайних поднесущих до 10%, можно обеспечить передачу информации на фоне стационарных помех в ионосферных каналах радиосвязи в исследованных КВ поддиапазонах на скоростях:

- в поддиапазоне частот 3 – 9 МГц от 19 кбит/с – до 47 кбит/с;
- в поддиапазоне частот 9 – 14 МГц от 47 кбит/с – до 95 кбит/с;
- в поддиапазоне частот 14 – 20 МГц от 95 Мбит/с до – 142 кбит/с.

Полученные результаты расчета показывают потенциальную возможность обеспечения более высокой скорости передачи информации без ограничений на выбор рабочей частоты, по сравнению с возможностями новых разработок скоростных КВмодемов [3, 4], в условиях ограниченности частотного ресурса КВдиапазона из-за большой загруженности работой территориально-разнесенных станций.

Также следует отметить, что учет возможной неравномерности спектра уровня станций (см. рис. 3), для обеспечения заданной помехоустойчивости в поддиапазонах с большей неравномерностью уровней стационарных помех, характерных более высокими частотам, потребуется большее соотношение уровней сигнала/помеха в точке приема, которое достигается большей мощностью передатчика или применением антенн с большим коэффициентом усиления [10, 11].

С учетом проведенных исследований зависимости КВК интерференционного поля узкополосных стационарных помех рассчитана помехоустойчивость ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов в ионосферных каналах с релейскими замираниями, которые показали возможность достижения битовой вероятности ошибки не более $BER \leq 10^{-3}$ при соотношении уровней сигнал/шум на входе ЦАР от -2 до 1 дБ в случаях использования 16- и 10-элементных ЦАР, соответственно (рис. 4).

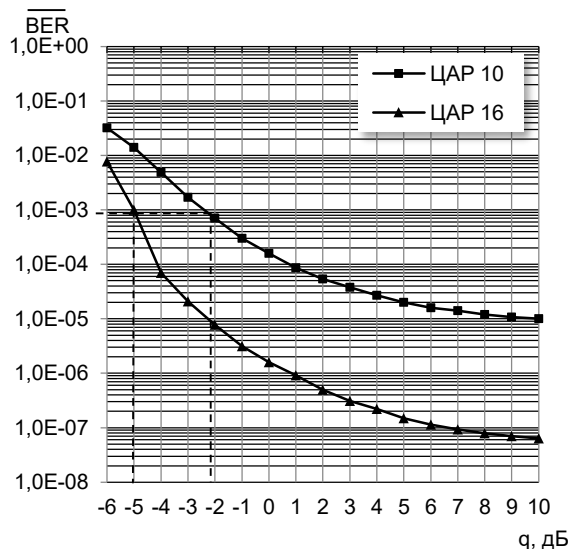


Рис. 4. Зависимость средней битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум на входе ЦАР в каналах с замираниями

Заключение

Таким образом, полученные результаты исследований показали потенциальную возможность обеспечения повышенной скорости передачи информации в КВканалах радиосвязизагруженных узкополосными стационарными помехами за счет их компенсации в трактах обработки ЦАР с пространственно-корреляционной обработкой сигналов.

Литература

1. Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиополос – М.: Связь, 1979. – 296 с.
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн – М.: Связь, 1972. – 336 с.
3. Романов Ю.В. Эволюция высокоскоростных КВ-радиомодемов в XX веке // Научно-технический сборник. Техника радиосвязи. – Омск, 2016. – № 1(28). – С. 72–88.
4. Пукса Д.О., Романов Ю.В. Результаты трассовых испытаний адаптивной КВ-радиополосы высокоскоростной передачи данных файлового типа на базе радиомодема с полосой сигнала до 40 кГц // Научно-технический сборник. Техника радиосвязи. – Омск, 2015. – № 4(27). – С. 14–20.
5. Патент RU 2639657.С1.МПК H04L5/00, H04L27/26 (2006.01). Способ адаптации системы КВ радиосвязи с OFDM-сигналами/ Землянов И.С., Юрьев А.Н.; опубл.21.12.2017. Бюл. №36
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер. с англ. /под ред. В.И. Журавлева – М.: Радио и связь,2000. – 520 с.
7. Долгих В.Н., Орошук И.М., Прищепа М.Н. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов корреляционным пространственным фильтром // Акустический журнал. – 2007. – Том 53, № 2. – С. 226-232.
8. V.N. Dolgikh, I.M. Oroschuk, M.N. Prishchepa Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter // Acoustical Physics. – 2007, Vol. 53. № 2. pp.190 – 196. New York
9. Орошук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. Возможности неэквидистантных цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов // 17-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – Москва, Российское НТОРЭС им. А.С. Попова. Россия. Доклады. 2015. – С. 302–305.
10. Орошук И.М., Сучков А.Н., Жариков-Горский В.А. Имитационное моделирование отклика цифровых антенных решеток с пространственно-корреляционным методом обработки сигналов декаметрового диапазона // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2016, №12.
11. Жариков-Горский В.А. Критерии оптимизации построения апертуры нелинейных антенных решеток декаметрового диапазона // IV Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь». Сборник докладов. – Омск: АО «ОНИИП», 2017. – С. 204-209.

References

1. Kalinin A.I. Rasprostraneniye radiovoln na trassakh nazemnykh i kosmicheskikh radiolinii [Propagation of radio waves on the routes of ground and space radio lines]. M.: Svyaz', 1979, 296 p.
2. Dolukhanov M.P. Rasprostraneniye radiovoln [Radio wave propagation]. M.: Svyaz', 1972, 336 p.
3. Romanov Yu.V. Evolyutsiya vysokoskorostnykh KV-radiomodemov v XX veke [Evolution of high-speed HF radio modems in the twentieth century]. Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Tekhnika radiosvyazi. Omsk, 2016. № 1(28). p. 72–88.
4. Puksa D.O., Romanov Yu.V. Rezul'taty trassovykh ispytaniy adaptivnoy KV-radiolinii vyso-koskorostnoy peredachi dannykh faylovogo tipa na baze radiomodema s polosoi signala do 40 KHz [The results of the route tests of an adaptive HF radio link for fast file data transmission on the basis of a wireless modem with signal band to 40 KHz]. Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Tekhnika radiosvyazi. Omsk, 2015. № (27). p. 14–20.
5. Patent RU 2639657.S1.MPK N04L5/00, H04L27/26 (2006.01). Sposob adaptatsii sistemy KV radiosvyazi s OFDM-signalami [Method for adapting a HF radio communication system with OFDM signals] / Zemlyanov I.S., Yur'ev A.N., opubl. 21.12.2017. Bul. №36
6. Feer K. Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra: per. S angl. pod red. V.I. Zhuravleva [Wireless digital communication. Methods of modulation and spectrum extension: TRANS. from English. /edited by V. I. Zhuravlev]. M.:Radioi svyaz',2000, 520 p.
7. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Veroyatnostnye kharakteristik iobnaruzheniya signalov korrelyatsionnym prostranstvennym fil'trom. Akusticheskiy zhurnal [Probabilistic characteristics of signal detection by a correlation spatial filter]. 2007. Tom 53, № 2, p. 226-232.
8. Dolgikh V.N., Oroschuk I.M., Prishchepa M.N. Probabilistic Characteristics of Signal Detection by a Spatial Correlation Filter. Acoustical Physics. 2007, Vol. 53. № 2. p.190 – 196. New York
9. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Vasilenko A.M. Vozmozhnosti neekvidistantnykh tsifrovyykh antennykh reshetok s prostranstvenno-korrelyatsionnym metodom obrabotki signalov [Possibilities of non-equidistant digital antenna arrays with spatial correlation method of signal processing]. 17-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye». Moskva, Rossiyskoe NTORES im. A.S. Popova. Rossiya. Doklady. 2015. p. 302–305.
10. Oroschuk I.M., Suchkov A.N., Zharikov-Gorskiy V.A. Imitatsionnoe modelirovaniye otklika tsifrovyykh antennykh reshetok s prostranstvenno-korrelyatsionnym metodom obrabotki signalov dekametrovogo diapazona [Simulation of the response of digital antenna arrays with spatial correlation method of HF range signal processing]. Zhurnal radioelektroniki [elektronnyy zhurnal], 2016, №12.
11. Zharikov-Gorskiy V.A. Kriterii optimizatsii postroeniya apertury nelineynykh antennykh reshetok dekametrovogo diapazona [Optimization criteria for constructing the aperture of nonlinear antenna arrays in the decameter range]. IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiotekhnika, elektronika i svyaz'». Sbornik dokladov. Omsk: AO «ONIIP», 2017. p. 204-209.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Игорь Михайлович Орошчук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6 e-mail: Oroshchuk@yandex.ru

Михаил Викторович Соловьев, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: ssoloveva@list.ru

Андрей Николаевич Сучков, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры, Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Алексей Анатольевич Гаврилов, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: ywar@yandex.ru

Igor M. Oroshchuk, Dr. Sci. (Eng). Professor, Professor of the Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: Oroshchuk@yandex.ru

Mikhail V. Soloviev, post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: ssoloveva@list.ru

Andrey N. Suchkov, associate Professor, Ph.D. (Eng)., Director of Department, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: Suchkov-Andrey-1981@yandex.ru

Aleksey A. Gavrilov, post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: ywar@yandex.ru

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.025

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

Нейронные сети как вариант вычислительной структуры системы классификации морских целейВ.А. Пятакович¹, В.Ф. Рычкова², Е.Г. Филиппов³¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ³Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Многочисленные эксперименты по обучению нейронных сетей показали, что совокупное использование алгоритма локальной оптимизации, процедуры «выбивания» сети из локального минимума и процедуры увеличения числа нейронов приводят к успешному обучению нейронных сетей. Оценка адекватности результатов моделирования процесса распространения звука в морской среде выполнялась с использованием данных измерений потерь при распространении звука, полученных в ходе натурального эксперимента, на базе Центрального научно-исследовательского испытательного гидроакустического полигона. При этом использовались расчетные потери при распространении звука, полученные по апробированным программам, зарекомендовавшим себя на практике. В работе предложен метод формирования и редукции выборок, который обеспечивает сохранение в сформированной подвыборке важнейших свойств исходной выборки, не требуя при этом загрузки в память ЭВМ исходной выборки, а также многочисленных проходов исходной выборки, что позволяет сократить объем выборки и уменьшить требования к ресурсам автономного нейроклассификатора.

Ключевые слова: классификация морских объектов, гидрофизические поля, нечёткая логика, нейронные сети, нейро-нечёткие модели, системы автоматического управления, обучающие алгоритмы нейронных сетей.

The neural networks as the variant of computative structure of classification system of sea targetsValeriy A. Pyatakovich¹, Victoria F. Rychkova², Evgenii G. Filippov³¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, ³Far Eastern Federal University

Abstract. Numerous experiments on training of neural networks showed that cumulative local optimization algorithm, «knocking out» the network of local minimum and procedures for increasing the number of neurons leads to successful learning of neural networks. The simulation, including solution of problems such as simulating the instantaneous location of recognized object and its movement parameters, simulating the climatic variability of the vertical distribution of sound speed in water using a database of typical sound speed vertical distribution curves, simulating the informational flows that occur in the "receiver-source" situations, is aimed at generating a data set for the training set sampling. The adequacy assessment of the modeling results of sound propagation in the sea medium was carried out using both the data obtained during the live experiment and the output from the field-proven programs that showed themselves well in practice. The method of formation and reduction of samples, which ensures the preservation of the formed subsample of the most important topological properties of the original sample, without requiring loading into the computer memory of the original sample, as well as numerous passes of the original sample, which allows to reduce the sample size and reduce the requirements for computer resources.

Key words: classification of sea objects, fuzzy logic, neural networks, neuro-fuzzy models, automatic control systems, training algorithms of neural networks.

Введение

Существует множество терминов, определяющих понятие «искусственная нейронная сеть» (ИНС). Приведем некоторые из них: нейронные сети, нервные сети, нейроподобные сети, нейристорные сети (nerve networks, rescan de nerfs, nerven netze) и т.д. Под нейроподобной сетью в данной работе понимается совокупность искусственных нейронов, связанных между собой с целью передачи и преобразования информации (см. работы Д.Д. Хопфилда, Р.Е. Каллана, Г.А. Карпентура, Т.К. Кохонена, Д.Ф. Люгера и др. [5, 10, 12]). Нейроподобную сетевую конструкцию можно рассматривать и как способ параллельной обработки данных при классификации образов технических источников информационных полей в морской среде. Способ, широкое применение которого предсказывали классики кибернетики (У. Рос Эшби,

Н. Винер, С. Каморан и др.), наконец занял свое место, получил интенсивное аналитическое и техническое развитие на принципах, заимствованных из нейрофизиологии.

В данной работе мы будем рассматривать нейроподобные сети как вариант вычислительной структуры, построенной на тех же принципах. С точки зрения архитектуры [4, 8, 10, 12, 13] искусственные нейроподобные сети представляют собой вариант параллельной мелкозернистой однородной вычислительной структуры, реализующей потоковую обработку данных. Эта обработка может быть синхронной и асинхронной. К настоящему времени нейросетевые технологии расширяют возможности при решении задач обработки сигналов и распознавания образов морских объектов.

Область применимости и адекватность используемого метода

Анализ использования возможных методов классификации морских объектов и особенностей основной решаемой задачи, а именно создание системы мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием нейросетевых технологий позволил выделить два типа нейросетей, наиболее перспективных для решения поставленной задачи: многослойный перцептрон (обучается методом обратного распространения ошибки) и сеть встречного распространения ошибки. Сейчас искусственные нейронные сети являются лишь упрощенным подобием естественных (биологических) нейронных сетей. Нервные системы человека и животных гораздо сложнее тех устройств, которые можно создать с помощью современных технологий. Однако для успешного решения многих практических задач оказалось достаточным «приблизительно» понять общие нормы функционирования нервной системы.

Некоторые виды нейронных сетей представляют собой математические модели, имеющие всего лишь отдаленное сходство с нейрофизиологией, что отнюдь не препятствует их практическому применению. Такие характеристики нейросетевых методов, как возможность нелинейного моделирования и сравнительная простота реализации, часто делают их незаменимыми при решении сложнейших многомерных задач [4, 8, 10, 12, 13].

Нейронные сети нелинейны по своей природе и представляют исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных (термин, используемый в отношении ряда свойств многомерных пространств и комбинаторных задач. Впервые термин ввел Ричард Эрнст Беллман применительно к общей задаче динамического программирования [1]. Выражение употребляется в работах по технической кибернетике, машинному обучению и анализу сложных систем, в том числе в заголовках).

Обучение – это итерационная процедура, требующая длительных вычислений. На каждой итерации происходит уменьшение функции ошибки. Если выбраны множество обучающих примеров – пар (X_m, Y_m) ($m=1, 2, \dots, M$) – и способ вычисления функции ошибки D , обучение нейронной сети превращается в задачу многомерной оптимизации. Функция D может иметь произвольный вид. Поэтому обучение в общем случае – многоэкстремальная невыпуклая задача оптимизации.

Для решения этой задачи могут быть использованы алгоритмы: локальной оптимизации с вычислением частных производных первого порядка, локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка, стохастические алгоритмы оптимизации и алгоритмы глобальной оптимизации.

К первой группе относятся: градиентный алгоритм (метод скорейшего спуска), методы с одномерной и двумерной оптимизацией целевой функции в

направлении антиградиента, метод сопряженных градиентов, методы, учитывающие направление антиградиента на нескольких шагах алгоритма.

Ко второй группе относятся: метод Ньютона, методы оптимизации с разреженными матрицами Гессе, квазиньютоновские методы, метод Гаусса–Ньютона и Левенберга–Марквардта (алгоритм Левенберга–Марквардта – метод оптимизации, направленный на решение задач о наименьших квадратах, альтернатива методу Ньютона, может рассматриваться как комбинация последнего с методом градиентного спуска, или как метод доверительных интервалов; алгоритм был сформулирован независимо Левенбергом в 1944 г. и Марквардтом – в 1963 г.).

Стохастическими алгоритмами являются поиск в случайном направлении, имитация отжига, метод Монте-Карло (численный метод статистических испытаний). Задачи глобальной оптимизации решаются с помощью перебора значений переменных, от которых зависит целевая функция. Для сравнения методов обучения нейронных сетей необходимо использовать в качестве критериев количество шагов алгоритма, необходимых для получения решения и количества дополнительных переменных, которые потребуются для организации вычислительного процесса.

Обобщая сказанное, процесс обучения нейронной сети состоит в поиске целевой функции $g(E)$, оптимальной по E , где E – синаптическая матрица сети. Обычно это итерационная процедура, весьма сложная и длительная при ее прямом использовании.

Существуют три парадигмы обучения: с учителем, самообучение и смешанная. В первом случае при обучении используют набор правильных ответов на каждый входной набор и по ним настраивают весовые коэффициенты. При обучении без учителя не требуются знания правильных ответов на каждый обучающий пример. В этом случае раскрывается внутренняя структура данных или корреляция между образцами в системе данных, что позволяет распределить данные по категориям. При смешанном обучении часть весов определяется посредством обучения с учителем, а другая часть получается с помощью самообучения.

Здесь необходимо коротко раскрыть определения фундаментальных проблем обучения: емкости, сложности образов и вычислительной сложности. Емкость – это понятие, связанное с количеством образов, которые может запомнить сеть, и возможностями сети после обучения.

Сложность образов определяет число обучающих примеров, необходимых для достижения способности сети к общению. Понятие «вычислительная сложность» подразумевает функцию зависимости объема работы, которая выполняется некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Для управляемого обучения сети необходимо подготовить набор обучающих данных. Эти данные представляют собой примеры входных данных (признаков) и соответствующих им выходов (классов). С помощью того или иного алгоритма сеть учится устанавливать связь между первыми и вторыми [3, 8].

Наиболее распространены следующие фундаментальные правила обучения: коррекция по

ошибке, алгоритм (машина) Больцмана, набор правил Хебба, обучение методом соревнования (конкуренции), генетический алгоритм. Следует отметить, что во многих практических задачах адаптировать известный алгоритм – не менее сложная задача, чем создать собственный (только под решаемую задачу).

Понятие класса морского объекта (МО) связано с числом характеризующих его классификационных признаков N , описываемых рядом аппаратно измеренных или расчетных параметров. Каждому классу морского объекта соответствует N – мерный случайный вектор признаков X . Вектор признаков описывается строкой фактически полученных значений параметров по одному морскому объекту к моменту принятия решения о ее классе. По терминологии искусственных нейронных сетей такая строка называется строкой фактов (наблюдений). Вопрос о том, сколько таких строк в матрице наблюдений необходимо иметь для обучения нейронной сети, решающей достаточно сложную задачу распознавания морских объектов, непростой. Существуют общие рекомендации относительно оценки размера матрицы данных обучения [1, 3, 7, 8, 12].

Например, выполнение следующего неравенства: $M > W/\varepsilon$, где M – количество данных обучения (строк в матрице), W – число синаптических связей, ε – доля ошибок, допустимая в ходе тестирования. Так, при допустимости 10% ошибок число наблюдений должно быть в 10 раз больше числа имеющихся в сети весовых коэффициентов.

Прежде чем приступить непосредственно к разработке нейронной сети, нужно решить, какие переменные использовать в обучающей выборке. Значения классификационных признаков морского объекта одного класса могут меняться в некоторых пределах, поэтому необходимо знать их статистические свойства. Часть параметров зависят от условий распространения звуковой энергии в морской среде, поэтому при обучении следует учесть изменчивость вертикального распределения скорости звука [4, 6, 8, 12].

Первоначальный выбор исходных переменных (данных обучения) зачастую определяется интуицией эксперта, и возможно включение максимального их числа. На последующих этапах размеры выборки могут корректироваться. Расчеты показывают, что число строк фактов M , описывающих модель поля скорости звука в заданной пространственно-временной области, должно быть от 30 до 50 тысяч даже без учета требований, выдвинутых в работах [2, 3, 10].

Сформировать обучающую выборку можно двумя путями. Первый сопряжен с накоплением данных в натуральных условиях. Даже при получении большого объема информации таким путем выборки будут ограничены временем проведения измерений и пространством района, они имеют локальный характер, и ценность их как представительного статистического материала для обучения нейросети низка.

Если учесть, что обученная нейронная сеть должна обеспечивать принятие решения в пределах некоего интервала глубин расположения шумящего объекта, дистанций и множества вариантов гидрологических условий, связанных с

климатической изменчивостью вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), то получение представительной обучающей выборки в натуральных условиях становится не просто дорогостоящей, но и невыполнимой задачей. Каким бы ни был набор наблюдений в реальных условиях, он не в состоянии отобразить того многообразия ситуаций и явлений, которые могут возникнуть. Кроме того, сбор натуральных данных сопровождается ошибками наблюдений, счисления и гидроакустических измерений, искажениями, отскоками или просто отсутствием данных.

От этого не спасают даже современные возможности контроля навигационной обстановки и соблюдение метрологических требований при электроакустических измерениях. Отскоки же, лежащие далеко от области правдоподобных значений некоторой переменной, могут исказить результат обучения. Хотя нейронные сети в целом устойчивы к шумам, у этой устойчивости есть предел.

Моделирование информационной ситуации

Следует отметить, что полезность натуральных данных мы не отвергаем вообще, поскольку они могут пригодиться при тестировании уже обученной нейронной сети и при оценке адекватности принятой модели. Поэтому мы предлагаем второй путь – имитационное моделирование информационной ситуации, возникающей в процессе классификации подводных технических объектов комплексной системой морского мониторинга.

Имитационное моделирование обеспечивает достаточно гибкую среду для поиска и проверки исследовательских идей. Для многих приложений такое моделирование оказывается вполне адекватным и достаточным, а в нашем случае – единственным способом оценить возможности классификации в рамках климатической изменчивости морской среды и влияние этой изменчивости на процесс распознавания морских объектов. Имитация должна включать в себя три основных процесса: моделирование навигационной обстановки; моделирование параметров движения морского объекта; моделирование канала распространения звуковой энергии. Имитационная модель – своего рода универсальное средство исследования сложных систем – представляет логико-алгоритмическое описание поведения отдельных компонентов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в моделируемой системе [20].

В состав имитационной модели комплекса имитационного моделирования (КИМ) должна быть включена модель приемной антенны гидроакустической станции (ГАС) с детерминированными техническими параметрами, глубиной погружения и блоком расчета (измерения) значений параметров классификационных признаков. В этом блоке могут быть использованы правила расчета значений формализованных классификационных признаков.

Моделирование навигационной обстановки должно обеспечивать воспроизведение генераций случайных значений координат морского объекта, глубины его погружения и курса. Скорости каждого морского объекта в процессе имитации назначаются

в рамках заданных распределений, производится определение соответствующих курсовых углов и пеленгов на объект [2, 6]. Для морского объекта определенного класса необходимо назначить уровни шумоизлучения соответственно его скорости. Построить область сектора, радиус которого должен быть равен предельно возможной дальности действия носителя ГАС, обнаруживающего морской объект. В качестве модели канала распространения в работе применяется модель, разработанная В.Н. Матвиенко и Ю.Ф. Тарасюк [6].

Модель распространения гидроакустических сигналов базируется на представлении среды с помощью плоскопараллельных слоев, с постоянными значениями градиентов скорости звука.

В качестве главного объекта модели канала распространения, определяющего имитацию изменчивости потерь на распространение, используем статистическую климатическую модель вертикального распределения скорости звука.

Методическая основа выделения представительных кривых ВРСЗ в заданном районе-сезоне (пространственно-временной области), согласно этой модели [4] подразумевает, что каждой из таких кривых может быть поставлена в соответствие тройка чисел, характеризующих вероятностную оценку значимых параметров вертикальной структуры поля скорости звука: {РТСЗ, РОТ, РВРСЗ}. Обозначив соответствующие вероятности через P_1 – P_3 , в терминах нечетких множеств можем записать модель поля скорости звука в заданной пространственно-временной области:

$$C = \{T_i P_1 + N_i P_2 + C(N)_i P_3\},$$

где T_i – тип распределения скорости звука по глубине i -й представительной кривой ВРСЗ; N_i – глубина залегания опорных точек; $C(N)_i$ – значения скорости звука на стандартных горизонтах.

Имитационное моделирование непосредственно процесса подводного распространения звука проводилось нами с целью генерации набора данных для формирования обучающей выборки комплексом имитационного моделирования. Программа расчета параметров гидроакустического поля (ПГАП) «Дальность» (элемент структуры КИМ) основана на лучевом приближении решения волнового уравнения. Лучевая теория позволяет получить важные сведения о распространении звука в морской среде. Расчетные модули программы работают с данными натурных измерений и осуществляют автоматизированную выборку данных из баз многолетней гидрологической информации.

Одной из особенностей моделирования морской обстановки является необходимость имитации функционирования множества сложных объектов, входящих в ее состав. В частности, к таким объектам относятся надводные корабли и подводные лодки, летательные аппараты, стационарные объекты (буи, нефтяные вышки и т.п.). Большинство объектов являются сложными техническими системами. В связи с этим имитационное моделирование полноценной морской обстановки позволяет сформировать выборку с необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей.

Целесообразность дальнейшей разработки кратко описанного ниже КИМ, обеспечивающего эффективность формирования обучающей выборки

для нейросетевых линий классификации морского объекта (МО) и представляющего собой неотъемлемую часть процесса создания системы мониторинга полей различной физической природы в морской среде [8, 12, 20], должна стать предметом дальнейшего исследования на основании результатов проводимого тестирования.

Считаем необходимым хотя бы очень кратко остановиться на описании разработанного и тестируемого комплекса имитационного моделирования (КИМ) навигационной обстановки. Задача конфигурирования системы имитационного моделирования заключается в нахождении соответствия между объектами и моделями. Конфигурирование осуществляется на этапе инициализации вычислительно-моделирующего комплекса (ВМК). Хранение входных и выходных параметров моделей и передача их между компонентами КИМ обеспечиваются ВМК.

Возможность динамического конфигурирования КИМ основывается на: классификации объектов и имитационных моделей; унификации динамических параметров объектов морской обстановки; унификации программного интерфейса имитационных моделей; унификации программного интерфейса модулей библиотеки моделей.

Классификация объектов обеспечивает возможность разработки специализированных моделей для объектов различной физической природы и характеризовать их различными параметрами в ВМК. Унификация программного интерфейса моделей позволяет производить операции с моделями различных МО. За счет этого обеспечивается независимость программной реализации от реализации частных имитационных моделей. Задача унификации программного интерфейса моделей решена на базе объекто-ориентированной технологии программирования. Все имитационные модели МО реализованы в виде классов, наследников базового класса, определяющего единый интерфейс модели. Интерфейс имитационной модели определяет основные функции моделирования, которые вызываются на КИМ.

Реализации имитационных моделей объектов размещаются в программных модулях (DLL). Произвольный набор программных модулей образует библиотеку моделей объектов морской обстановки. Унификация программного интерфейса модулей реализации моделей позволяет при загрузке задания на моделирование информационной ситуации навигационной обстановки поставить каждому МО в соответствие имитационную модель.

Реализация программного интерфейса модулей основана на возможности экспортируемых функций DLL. Каждый модуль библиотеки имитационных моделей экспортирует две функции, обеспечивающие: получение информации о реализованных в модуле моделях (GetOwnAlgoInfo); создание экземпляра выбранной имитационной модели (CreateOwnAlgo).

Первая функция позволяет получить список реализованных в модуле моделей и их классификационные признаки (для какого класса и типа объектов предназначена модель). Классификация моделей совпадает с

классификацией объектов, однако в отличие от нее допускает неопределенность. То есть для имитационной модели может быть не указан конкретный класс и наименование объекта, в этом случае модель подходит для моделирования объектов указанного типа и различных классов и наименований.

Алгоритм загрузки имитационных моделей по полученному из задания на моделирование информационной ситуации находит наиболее полно соответствующую модель МО и использует функцию CreateOwnAlgo для создания экземпляра этой модели.

Реализованное таким образом динамическое конфигурирование КИМ позволяет: максимально быстро получить функционирующий вариант модели морской обстановки на основе минимального количества частных моделей; увеличивать количество и качество моделей МО; разрабатывать частные имитационные модели информационной ситуации навигационной обстановки.

Таким образом, при удовлетворительных результатах тестирования дальнейшая разработка КИМ, обеспечивающего эффективность формирования обучающей выборки для нейросетевых линий классификации МО, системы мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием нейросетевых технологий, должна подразумевать решение следующих задач: имитации мгновенного расположения распознаваемого объекта и параметров его движения относительно носителя ГАС; имитации климатической изменчивости ВРСЗ, а следовательно, и параметров гидроакустических полей с использованием базы данных типичных кривых вертикального распределения скорости звука; имитации информационных потоков, возникающих в дуэльных ситуациях «приемник–источник» с записью полученных данных, в том числе и о параметрах классификационных признаков, на магнитные носители; разработки модуля управления имитационной моделью; оценки адекватности модели; оптимизации имитационной модели.

Отметим, что существующие методы распознавания, базирующиеся на развитой алгоритмической и технической базе, применяемые для распознавания морских объектов, в конечном счете определяются подготовкой эксперта-пользователя (оператора), т.е. использование нечеткой логики не вносит диссонанс в построение систем распознавания. Сети, построенные на нечетких множествах, весьма эффективны, что подкреплено рядом доказанных теорем, аналогичных теоремам о полноте для искусственных нейронных систем.

Возможно одновременное использование различных композиций нечетких выводов. Сама схема выводов может быть многокаскадной. Перспективы такого подхода: можно принимать правильные решения в условиях неполной и нечеткой входной информации об идентифицируемом объекте. Нечеткая логика в решении этих задач оказывается особенно полезна, когда в рассуждении присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов.

С помощью методов теории нечетких множеств можно получать аналитические выражения для количественных оценок нечетких условий принадлежности признаков к тому или иному множеству (группе классификационных признаков объекта распознавания). Они позволяют эффективно решать сложные задачи обработки информации, когда классы, подлежащие разделению, имеют произвольную форму и пересекаются между собой, отличаются высокой точностью и эффективностью в условиях неопределенности, низким временем обучения, надежностью против помех.

Метод формирования и редукции выборок большого объема

Построение моделей принятия решений на основе нейронных и нейронечетких сетей, а также деревьев решений [12, 13] при решении интеллектуальных задач обнаружения и классификации морских целей предполагает необходимость оперировать выборками данных большого объема. Это влечет за собой существенные затраты времени на обработку данных, а также требует значительных объемов оперативной и дисковой памяти ЭВМ. Поэтому актуальна задача сокращения размерности выборок данных.

Традиционным и наиболее широко применяемым подходом при решении данной задачи является использование методов отбора информативных признаков (удаляют из исходного набора наименее информативные признаки) и методов конструирования признаков (заменяют исходный набор признаков рассчитанным на его основе набором искусственных признаков меньшего размера). Однако если изначально заданный набор признаков не является избыточным либо объем выборки (число экземпляров в ней) чрезвычайно велик для представления и обработки в памяти ЭВМ, применение этих методов оказывается чрезвычайно затруднительным, а результаты работы либо приводят к потере существенной для дальнейшего анализа информации, либо не позволяют сохранить исходную интерпретируемость данных.

Другим, существенно реже используемым на практике, подходом при решении данной задачи является сокращение объема выборки. Как правило, это реализуется посредством извлечения случайных подвыборок из исходной выборки, что может приводить к формированию нерепрезентативных в топологическом смысле выборок вследствие невключения в них редко встречающихся экземпляров на границах классов, представленных в исходной выборке.

В работах [12–15] предложены переборные и эволюционные методы формирования выборок, а также модель (комплекс критериев) качества выборки, которые позволяют обеспечить формирование из исходной выборки подвыборок меньшего объема, обладающих в системе используемых критериев наилучшими свойствами. Однако для выборок очень большого объема применение данных методов и модели оказывается весьма затратным как с вычислительной точки зрения, так и с точки зрения ресурсов оперативной и

дисковой памяти автономной интеллектуальной системы.

Пусть мы имеем исходную выборку $X = \langle x, y \rangle$ – набор S прецедентов о зависимости $y(x)$, $x = \{x^s\}$, $y = \{y^s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, характеризующихся набором N входных признаков $\{x_j\}$, $j = 1, 2, \dots, N$, где j – номер признака, и выходным признаком y . Каждый s -й прецедент представим как $\langle x^s, y^s \rangle$, $x^s = \{x_j^s\}$, где x_j^s – значение j -го входного; y^s – значение выходного признака для s -го прецедента (экземпляра) выборки; $y^s \in \{1, 2, \dots, K\}$, где K – число классов, $K > 1$.

Тогда задача формирования обучающей выборки может быть представлена как задача выделения из исходной выборки $X = \langle x, y \rangle$ подвыборки X^* , $X^* \subset X$, меньшего объема $S^* < S$, обладающей наиболее важными свойствами исходной выборки.

Поскольку для задач автоматизации классификации морских целей наиболее важным является сохранение топологии классов, то формируемая подвыборка должна обеспечивать сохранение экземпляров исходной выборки, находящихся на границах классов.

Для обнаружения объектов, находящихся на границах классов, в общем случае необходимо решить задачу кластер-анализа, что требует определения расстояний между всеми экземплярами выборки. Это, в свою очередь, требует либо загрузки всей выборки в память ЭВМ (что не всегда возможно из-за ограниченного объема оперативной памяти), либо многократных проходов по исходной выборке (что вызывает значительные затраты машинного времени), а также приводит к необходимости хранить и обрабатывать матрицу расстояний между экземплярами большой размерности.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается заменить обработку экземпляров на обработку их описаний в виде числовых скаляров, которые характеризуют положение экземпляров в пространстве признаков.

При этом, заменив экземпляры, характеризующиеся N признаками, на представления в виде скаляров, мы отобразим N -мерное пространство признаков в одномерное пространство.

Исходная выборка, будучи отображенной в одномерное пространство, позволит выделить на одномерной оси интервалы ее значений, соответствующие кластерам разных классов в исходном N -мерном пространстве. Определив границы интервалов на одномерной оси, можно найти ближайшие к ним экземпляры, которые и составят формируемую подвыборку.

Приведенные выше идеи лежат в основе предлагаемого метода.

Этап инициализации. Задать исходную выборку данных $X = \langle x, y \rangle$.

Этап анализа характеристик выборки.

Определить x_j^{min} и x_j^{max} – соответственно, минимальное и максимальное значения j -го признака, $j = 1, 2, \dots, N$. Определить число интервалов для каждого признака: $k = K \cdot 1/n \cdot S$, а также длины интервалов: $\delta_j = (x_j^{max} - x_j^{min})/k$.

Этап расчета обобщенных признаков. Для каждого s -го экземпляра, $s = 1, 2, \dots, S$:

определить k_j – номер интервала значений по каждому j -му признаку, $j = 1, 2, \dots, N$, в который попадает s -й экземпляр

$$k_j = 1 + \left\lfloor \frac{x_j^s - x_j^{min}}{\delta_j} \right\rfloor;$$

рассчитать координату s -го экземпляра по обобщенной оси

$$I^s = \sum_{j=1}^N (k_j - 1)^2 + \frac{1}{\pi} \arccos \left(\frac{\sum_{j=1}^N k_j}{\sqrt{N \sum_{j=1}^N (k_j)^2}} \right).$$

Это позволит отобразить исходную выборку на одномерную обобщенную ось I (заметим, что при этом произойдет потеря части информации вследствие неявного квантования пространства признаков при преобразовании).

Этап анализа обобщенной оси. Сформировать набор кортежей $I = \{ \langle I^s, y^s, s \rangle \}$. Упорядочить набор I в порядке неубывания значений I^s . Просматривая обобщенную ось в порядке увеличения ее значений, определить граничные значения ее интервалов $\langle l_q, r_q \rangle$, в которых номер класса y^s остается неизменным, где l_q, r_q – соответственно левое и правое граничные значения q -го интервала обобщенной оси. Обозначим: K_q – номер класса, соответствующий q -му интервалу обобщенной оси; k_I – число интервалов обобщенной оси.

Этап анализа характеристик интервалов. Для каждого q -го интервала обобщенной оси, $k_q = 1, 2, \dots, k_I$, определить S_q – число попавших в него экземпляров, а также номера этих экземпляров.

Этап формирования обучающей выборки. Среди экземпляров q -го интервала включить в обучающую выборку X^* все экземпляры:

его класса, находящиеся на одной из границ интервала

$$X^* = X^* \cup \{ \langle x^s, y^s \rangle \mid y^s = K_q, x^s = l_q \vee x^s = r_q \}, s = 1, 2, \dots, S, q = 1, 2, \dots, k_I;$$

его класса, ближайшие к одной из границ интервала:

$$X^* = X^* \cup \{ \langle x^s, y^s \rangle \mid y^s = K_q, ((x^s - l_q) < \alpha) \vee ((r_q - x^s) < \alpha) \}, 0 < \alpha < 1, s = 1, 2, \dots, S, q = 1, 2, \dots, k_I,$$

где α – пороговый коэффициент, регулирующий близость экземпляров к границам интервала (например, можно задать: $\alpha = 0,1(r_q - l_q)$);

интервалов с малым числом экземпляров:

$$X^* = X^* \cup \{ \langle x^s, y^s \rangle \mid y^s = K_q, l_q \leq x^s \leq r_q \}, S_q < \beta \bar{S}, s = 1, 2, \dots, S, q = 1, 2, \dots, k_I,$$

где β – некоторый пороговый коэффициент, $0 < \beta < 1$ (например, можно за

дать: $\beta = 0,1$); \bar{S} – среднее число экземпляров в интервале обобщенной оси.

Этап устранения избыточности обучающей выборки. Определить расстояния между всеми

экземплярами, вошедшими в сформированную обучающую выборку, сформировав матрицу расстояний R (для упрощения и ускорения вычислений будем оперировать квадратами расстояний):

$$R(s, p) = \sum_{j=1}^N (x_j^s - x_j^p)^2, \quad s = 1, 2, \dots, S^*, \quad p = 1, 2, \dots, S^*.$$

Заметим, что $R(s, p) = R(p, s), a R(s, s) = 0$.

До тех пор, пока $\exists R(g, p) > 0, g \neq p$, выполнять в цикле действия: найти в матрице расстояний два экземпляра с наименьшим расстоянием между собой:

$$g, p = \arg \min_{\substack{g=1,2,\dots,S^* \\ p=g+1,\dots,S^*}} \{R(g, p) | R(g, p) \geq 0\};$$

если два ближайших экземпляра принадлежат к одному и тому же классу, то оставить в обучающей выборке только тот из них, который находится ближе к экземплярам других классов, а другой исключить из нее

$$X^* = X^* / \{ \langle x^q, y^q \rangle, q = \arg \max \{ R(g, q_g), R(p, q_p) \} | y^g = y^p \},$$

$$q_g = \arg \min_{\substack{s=1,2,\dots,S^* \\ s \neq g, s \neq p}} \{ R(g, s) | y^g \neq y^s, R(g, s) \geq 0 \},$$

$$q_p = \arg \min_{\substack{s=1,2,\dots,S^* \\ s \neq g, s \neq p}} \{ R(p, s) | y^p \neq y^s, R(p, s) \geq 0 \}.$$

Скорректировать соответствующим образом элементы матрицы R , установив:

$$R(s, q) = R(q, s) = -1;$$

если два ближайших экземпляра принадлежат к разным классам, то перейти к выполнению этапа дополнения (уточнения) обучающей выборки.

Этап дополнения (уточнения) обучающей выборки. Определить разность исходной и сформированной выборок

$$X' = X / X^*.$$

Последовательно для каждого s' -го экземпляра $\langle x^{s'}, y^{s'} \rangle$ выборки X' , $s' = 1, 2, \dots, S'$ относительно экземпляров сформированной выборки X^* :

найти расстояние (квадрат расстояния) от него до каждого экземпляра выборки X^* :

$$R^*(s', s^*) = \sum_{j=1}^N (x_j^{s'} - x_j^{s^*})^2;$$

если ближайший к s' -му экземпляру экземпляра сформированной выборки принадлежит к другому классу, то включить его в выборку X^* :

$$X^* = X^* \cup \{ \langle x^{s'}, y^{s'} \rangle | y^{s'} \neq y^{q'}, q = \arg \min_{s^*=1,2,\dots,S^*} \{ R^*(s', s^*) \} \}.$$

В результате выполнения данного метода для исходной выборки X получим сформированную обучающую выборку X' , которая будет обладать основными топологическими свойствами исходной

выборки. При этом также из исходной выборки можно получить также тестовую выборку как разность исходной и сформированной обучающей выборок.

Для определения целесообразности применения предложенного метода для конкретной задачи на практике используем нотацию Ландау в так называемом «мягком виде» и оценим сложность этапов предложенного метода.

Для этапа инициализации вычислительной сложностью можно пренебречь, а пространственная сложность может быть оценена как $O(NS)$.

Для этапа анализа характеристик выборки вычислительная сложность составит $O(2NS)$, а пространственная – $O(4N)$. Для этапа расчета обобщенных признаков вычислительная сложность может быть оценена как $O(9NS)$, а пространственная – $O(N + S)$.

Для этапа анализа обобщенной оси вычислительная сложность может быть оценена как $O(2S^2 + 2S)$, а пространственная – $O(3S + 3K1nS)$. Для этапа анализа характеристик интервалов вычислительная сложность может быть оценена как $O(3KS1nS)$, а пространственная – $O(K1nS)$.

Для этапа формирования обучающей выборки вычислительная сложность может быть оценена как $O(20KS1nS)$, а пространственная в виде $O(0,2K1nS + 0,2S)$.

Для этапа устранения избыточности обучающей выборки вычислительная и пространственная сложность могут быть оценены соответственно как $O(0,0016S^4 + (0,44 + 0,08N)S^2)$ и $O(0,04S^2)$.

Для этапа дополнения (уточнения) обучающей выборки вычислительная и пространственная сложность оцениваются соответственно как $O((0,48N + 0,32)S^2)$ и $O(0,8S)$.

Таким образом, общая сложность метода может быть оценена как:

$$\text{вычислительная} - O(0,0016S^4 + 0,56NS^2 + 2,76S^2 + 11NS + 2S + 23KS1nS);$$

$$\text{пространственная} - O(0,04S^2 + NS + 5N + 5S + 4,2K1nS).$$

Для упрощения оценок сложности метода введем следующие допущения. Поскольку $N \ll S$, примем, например, $N = 0,01S$. В простейшем случае $K = 2$.

С учетом принятых допущений получим оценки сложности метода:

$$\text{вычислительной} - O(0,0016S^4 + 0,0056S^3 + 2,87S^2 + 46S1nS + 2S);$$

$$\text{пространственной} - O(0,05S^2 + 5,05S + 8,41nS).$$

Обозначим размерность обучающей выборки $n = NS \approx 0,01S^2$, тогда, с учетом принятых допущений, округляя, получим оценки сложности метода:

$$\text{вычислительной} - O(16n^2 + 5,6n\sqrt{n} + 2870n + 2,3\sqrt{n}1n + 0,2\sqrt{n});$$

$$\text{пространственной} - O(5n + 0,505\sqrt{n} + 4,21n).$$

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода были разработано следующее программное обеспечение:

– программа имитации сигнала шумоизлучения подводных лодок на различных режимах движения (№ 2018613558 РФ. Оpubл.16. 03. 2018.);

– специализированный нейросетевой комплекс классификации зашумленных сигналов морских целей (№ 2018619739 РФ. Оpubл. 10.08.2018.);

– специализированный нейросетевой пакет для решения задач распознавания морских целей (№ 2018619799 РФ. Оpubл. 13.08.2018.);

– программный комплекс моделирования и обучения ИНС (№ 2019611455 РФ. Оpubл. 28.01.2019.); – программа проектирования и обучения искусственных нейронных сетей перцептронного типа (№ 2019611559 РФ. Оpubл. 29.01.2019.), с помощью которых проводились эксперименты по сокращению объема выборок данных для различных практических задач.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили работоспособность и практическую применимость предложенного метода, а также реализующего его программного обеспечения.

Свойства, определяемые обучающей выборкой

Монотонность выборки согласно [15,17] определяется как свойство выборки удовлетворять условию:

$$\forall s, p = 1, 2, \dots, S: x^s \leq x^p \rightarrow y^s < y^p.$$

Определим показатель монотонности i -го выхода по j -му входу для обучающей выборки $\langle x, y \rangle$ как:

$$I_{mon}^{i,j} = \frac{1}{S(S-1)} \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^S \{1 | x_j^s \leq x_j^p, y_i^s \leq y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки определим как:

$$I_{mon} = \frac{1}{N_M N_S (S-1)} \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^S \{1 | x_j^s \leq x_j^p, y_i^s < y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки будет равен единице для монотонной выборки, и нулю – для немонотонной выборки.

Очевидно, что чем выше уровень монотонности выборки, тем проще осуществить разделение выборки на классы и тем более простую нейросеть можно выбрать для решения задачи.

Разнообразие является одной из важнейших характеристик систем и определяется числом различных состояний системы.

В соответствии с законом «необходимого разнообразия» У. Р. Эшби [18], создавая систему, способную справиться с решением проблемы, обладающей определенным, известным разнообразием (сложностью), нужно обеспечить, чтобы система имела еще большее разнообразие (знания методов решения), чем разнообразие решаемой проблемы, или была способна создать в себе это разнообразие (владела бы методологией, могла разработать методику, предложить новые методы решения проблемы) [17].

Для генеральной совокупности при неизвестных распределениях признаков условно оценим предельное разнообразие как:

$$I_{div}(X, Y) =$$

$$\left(\prod_{i=1}^{N_M} \frac{(y_i^{max*} - y_i^{min*})}{\lambda_i^*} \right) \left(\prod_{j=1}^N \frac{(x_j^{max*} - x_j^{min*})}{\lambda_j^*} \right),$$

где λ_j – максимальное количество десятичных разрядов, которое может быть использовано для фиксации значений j -го признака (определяется возможностями измерительной аппаратуры и особенностями задачи); y_i^{max*}, y_i^{min*} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения i -го выходного признака; x_j^{max*}, x_j^{min*} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения j -го входного признака

Для обучающей выборки будем определять абсолютное разнообразие как:

$$I_{div}(x, y) = (N_M + N) \sum_{s=1}^S \left(1 \left| \prod_{p=s+1}^S \left(1 \left| \sum_{j=1}^N |x_j^s - x_j^p| = 0 \right. \right) \right. \right) = 0 \Bigg),$$

$$x \in X, y \in Y,$$

где $\langle X, Y \rangle$ – генеральная совокупность, из которой извлекается выборка $\langle x, y \rangle$, λ_j – количество десятичных разрядов, используемое для представления значений j -го признака в ЭВМ (на практике определяется типом данных и разрядной сеткой ЭВМ).

Для синтезируемой нейросетевой модели net (для общего случая полносвязной сети с внешним входом и собственными обратными связями нейронов) определим показатель предельного разнообразия как:

$$I_{div}(net) = \frac{N N_n^{max} \sum_{i=1}^{N_n^{max}} \vartheta_{np}(\varphi(i)) \vartheta_{np}(\psi(i))}{round\left(\frac{w^{max} - w^{min}}{\Delta w}\right)},$$

где N_n^{max} – максимально возможное количество нейронов в сети net, $\vartheta_{np}(element)$ – характеристика пластичности функционального элемента $element$ нейрона (будем полагать $\vartheta_{np}(element)$ равным числу возможных состояний элемента $element$: для дискриминантной функции i -го нейрона $\vartheta_{np}(\varphi(i))$ будет равняться числу возможных видов дискриминантных функций, которые могут быть заданы для данного нейрона; для функции активации i -го нейрона $\vartheta_{np}(\psi(i))$ будет равняться числу возможных видов функций активации, которые могут быть заданы для данного нейрона), $\vartheta_{np}^{max}(\varphi), \vartheta_{np}^{max}(\psi)$ – соответственно, максимальные характеристики пластичности дискриминантных и активационных функций среди всех нейронов сети, w^{max}, w^{min} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения весов сети, Δw – минимально возможное изменение веса с учетом разрядности вычислительной сетки ЭВМ, $round$ – функция округления к ближайшему целому числу.

На основе введенных абсолютных показателей предельного разнообразия определим относительные показатели:

Для обучающей выборки определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности:

$$I_{div}(x, X, y, Y) = \frac{I_{div}(x, y)}{I_{div}^*(X, Y)}$$

Для нейронной сети *net* определим показатель разнообразия по отношению к обучающей выборке:

$$I_{div}(net, < x, y >) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}(x, y)}$$

Для нейронной сети *net* определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности:

$$I_{div}(net, X, Y) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}^*(X, Y)}$$

Переобученность распознающей модели *net* на обучающей выборке *x* относительно тестовой выборки $x_{тест.}, x_{тест.} \neq x$, в [11] определяют как:

$$\delta_{net}(x, x_{тест.}) = v(net, x_{тест.}) - v(net, x),$$

$$n(net, x) = \frac{1}{S} \sum_{x=1}^S E(net, x^s),$$

где $n(net, x)$ – частота ошибок модели *net* на выборке *x* (в задачах классификации: $E(net, x^s) = \{1 | net(x^s) \neq y^s\}$, в задачах оценивания: $E(net, x^s) = \{1 | \delta \leq |net(x^s) - y^s|\}$, δ – порог ошибки).

Поскольку нейромодели могут на выходе определять значения не одной, а нескольких переменных, и порог ошибки для экземпляра на практике не всегда может быть задан, а также для большей универсальности и единообразия при решении различных задач определим:

$$E(net, x^s) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} \left(\frac{\Psi^{(n,i)}(x^s) - y_i^s}{\max_{s=1,2,\dots,S}(y_i^s) - \min_{s=1,2,\dots,S}(y_i^s)}\right)^2\right)$$

Эластичность функции $y(x)$ по переменной x_j , согласно [11], определяется как:

$$E_{x_j}(y) = \lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x_j}{x_j}} = \left(\lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x_j}\right) \frac{x_j}{y}$$

где $\Delta y = \frac{y(x_j + \Delta x_j) - y(x_j)}{y(x_j)}, x_j > 0, y > 0$.

Определим относительную оценку эластичности обучающей выборки $< x, y >$ с нормированием для выходной переменной y_i по входной переменной x_j как:

$$E_{x_j, y_i}(< x, y >) = \frac{\sum_{s=1}^S \tilde{x}_j^s}{2S} \times$$

$$\times \max_{\substack{s=1,2,\dots,S \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \frac{\max(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p) - \min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)}{\min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)} \left| \tilde{x}_j^s - \tilde{x}_j^p \right| \right\},$$

где

$$\tilde{x}_j^s = 1 + \frac{x_j^s - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p)}$$

$$\tilde{y}_i^s = 1 + \frac{y_i^s - \min_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(y_i^p)}$$

Относительную эластичность по переменной x_j аппроксимирующей функции $y_i = net(x)$, реализуемой нейросетью *net* на *i*-ом выходе y_i , обученной на основе обучающей выборки $< x, y >$, определим как:

$$E_{x_j}(net, y_i) = \frac{1}{2S} \sum_{s=1}^S \left(\frac{\tilde{x}_j^s (\tilde{\Psi}^{(N_M,i)}(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j) - \tilde{\Psi}^{(N_M,i)}(\tilde{x}_j^s))}{\Delta x_j (\tilde{\Psi}^{(N_M,i)}(\tilde{x}_j^s))^2} \right),$$

где $\tilde{\Psi}^{(N_M,i)}(\tilde{x}_j^s)$ – расчетное значение на *i*-ом выходе нейросети *net* при подаче на ее сети нормированных значений признаков *s*-го экземпляра; $\tilde{\Psi}^{(N_M,i)}(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j)$ – расчетное значение на *i*-ом выходе нейросети *net* при подаче на ее входы нормированных значений признаков *s*-го экземпляра, а на *j*-ый вход – скорректированного нормированного на Δx_j значения *j*-го признака *s*-го экземпляра.

Устойчивость к шуму – свойство нейросетей обеспечивать правильную реакцию на входной сигнал, содержащий шум.

Определим показатель устойчивости обученной нейросети к аддитивному шуму во входном сигнале по *j*-му входу как:

$$I_{tol j}^l = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left((net(x^s) - net({}_{(j^+)}x^s))^2 + (net(x_j^s) - net({}_{(j^-)}x^s))^2 \right)\right),$$

$${}_{(j^+)}x_g^s = \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S}(x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_g^p) \right), & g = j, \end{cases}$$

$${}_{(j^-)}x_g^s = \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S}(x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_g^p) \right), & g = j, \end{cases}$$

$$x_j^{s-} = x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) \right),$$

где l – заданный уровень шума, $0 < l < 1$.

Показатель устойчивости обученной нейросети к случайному аддитивному шуму во входном сигнале определим как:

$$I_{tol}^l = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left((net(x^s) - net(+x^s))^2 + (net(x_j^s) - net(-x^s))^2 \right)\right),$$

$$+x_j^s = x_j^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) \right),$$

$$-x_j^s = x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S}(x_j^p) \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

где l – заданный уровень шума, $0 < l < 1$. Для автоматизации процесса задания l предлагается использовать выражение:

$$l = \min_{j=1,2,\dots,N} \left\{ \frac{\min_{s=1,2,\dots,S} \{ |x_j^s - x_j^p| \|y^s \neq y^p\} }{\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p)} \right\},$$

Системные свойства нейромоделей

Эквифинальность – закономерность функционирования и развития системы, характеризующая её предельные возможности системы [13].

Определим относительную эквифинальность нейромодели net как

$$I_{ef}(net, < x, y >) = \frac{NN_w}{N_{Hmax}(N_{Hmax}^2 + N)} \times \exp\left(-\frac{1}{SN} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{N_M} (\Psi_{(x^s)}^{(i)} - y_i^s)^2\right),$$

где $\Psi_{(x^s)}^{(i)}$ – расчетное значение на i -ом выходе сети при подаче на ее входы экземпляра x^s .

Относительная эквифинальность будет принимать наибольшее значение (в пределе 1) для тех сетей, которые достигли максимально возможных размеров и связности в процессе синтеза структуры, а также наименьшей ошибки (в пределе 0) в процессе обучения. Эмерджентность (целостность) – закономерность, проявляющаяся в системе в возникновении, появлении у нее новых свойств, отсутствующих у элементов. Свойство целостности связано с целью, для выполнения которой создается система.

Степень целостности системы в соответствии с [13] определяется как

$$I_\alpha = \frac{C_v}{C_o},$$

где C_o – собственная сложность, представляющая собой суммарную сложность (содержание) элементов системы вне связи их между собой (в случае прагматической информации – суммарную сложность элементов, влияющих на достижение цели); C_v – взаимная сложность, характеризующая степень взаимосвязи элементов в системе (т.е. сложность ее устройства, схемы, структуры).

Применительно к нейросетевой модели определим эмерджентность как

Литература

1. Беллман Р., Энджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 205 с.
2. Дорогов А.Ю. Сколько примеров требуется для обучения нейронной сети // VIII Междунар. конф. «Нейроинформатика и ее приложения»: тез. докл. Красноярск, 2000. С. 59–60.
3. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильямс, 2001. 290 с.
4. Клименчук И.Н. Петухов В.И. Статистическая климатическая модель поля скорости звука для прикладных гидроакустических исследований. Подход с использованием ЭВМ // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. науч. тр. Владивосток: ТОВВМУ, 1989. С. 35–36.
5. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс, 2005. 864 с.
6. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
7. Об утверждении Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2010 г., № 2205-р. URL: <https://rg.ru/2010/12/21/mordeyatelnost-site-dok.html> (дата обращения: 10.08.2017).

$$I_\alpha = - \frac{\sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_H} \vartheta_{av}(i, j)}{\sum_{j=1}^{N_H} \vartheta_{ao}(j)},$$

где $\vartheta_{av}(i, j)$ – характеризует наличие связи между i -ым и j -ым нейронами сети ($\vartheta_{av}(i, j) = 1$, если связь имеется; в противном случае – $\vartheta_{av}(i, j) = 0$), $\vartheta_{ao}(j)$ – сложность j -го нейрона, которая может быть определена подобно [13] в единицах элементарных операций сложения и умножения.

Необходимо отметить, что в работе предложен комплекс моделей критериев, характеризующих такие свойства нейронных и нейро-нечетких сетей как разнообразие, переобученность, эластичность, эквифинальность, устойчивость к шуму, эмерджентность, что позволяет автоматизировать решение задачи анализа свойств и сравнения нейросетевых и нейро-нечетких моделей при решении задач классификации морских целей.

Заключение

В заключение отметим, что обучение нейронной сети экспертной системы мониторинга и классификации источников гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием имитационного моделирования информационной ситуации и методов нечеткой логики позволит оператору (обучающему эксперту) сформировать и проверить выборку с необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей системы мониторинга полей различной физической природы в морской среде.

При этом обучающий эксперт сможет владеть не только данными, доступными оператору ГАС на момент обнаружения, но и точными параметрами движения морского объекта, которые обеспечивают контроль обучения, но в обучающую выборку не входят.

От сформированной обучающей выборки зависит эффективность процесса обучения, способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этом этапе кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью, поэтому их приходится выбирать на основе компромисса. В работе предложено новое решение актуальной научно-практической задачи формирования выборок для автоматизации классификации данных.

8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016 190 с.
9. Jimenez L.A.T., Mayen H.G., Arteagoitia O.B., Garza D., Torres R. System for acoustic detection and autonomous classification of targets in the sea (SIDACAM). Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 137–144.
10. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics. Berlin and New York, 2001, 501 p.
11. Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E. A passive acoustic localization system for broadband sources. Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 341–348.
12. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.
13. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: Монография. – Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2018. – 263 с.
14. Патент № 2659100 РФ Способ формирования и применения широкомасштабной радиогидроакустической системы мониторинга, распознавания и классификации полей, генерируемых источниками в морской среде: / Василенко А.М., Пятакович В.А., Мироненко М.В. Опубл. 28.06.2018.
15. Пятакович В.А. Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий / Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 169–176.
16. Пятакович В.А., Пятакович Н.В., Пашкеев С.В. Расчет эффективности средств наблюдения как информационных источников экспертной интеллектуальной системы контроля морских акваторий // Стратегическая стабильность. – М.: 2018. № 3 (84). – С. 43–48.
17. Рудаков К. В. О методах оптимизации и монотонной коррекции в алгебраическом подходе к проблеме распознавания / К. В. Рудаков, К. В. Воронцов // Доклады РАН. – 1999. – Т. 367. – № 3. – С. 314–317.
18. Эшби У. Р. Введение в кибернетику / У. Р. Эшби. – М: Иностранная литература, 1959. – 432 с.
19. Замков О. О. Математические методы в экономике / О. О. Замков, А. В. Толстопятенко, Ю. Н. Черемных. – М.: «Дело и Сервис», 1999. – 366 с.
20. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Обучение нейронной сети как этап разработки экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. № 3(32). С. 138–149.

References

1. Bellman R., Angel E. Dynamic Programming and Partial Differential Equations [Dynamic programming and partial differential equations]. M., Mir, 1974, 205 p.
2. Dorogov A.Yu. How many examples required for training a neural network? [How many examples are required to train a neural network] Proc. 8th all-Russ. sem. Neuroinformatics and its applications. Krasnoyarsk, 2000, p. 59–60.
3. Kallan R. The essence of neural networks [Basic concepts of neural networks]. M., Vilyams Publ., 2001, 290 p.
4. Klimenchuk I.N., Petuhov V.I. Statistical climate model of the velocity field of the sound for applied hydro-acoustic research. Approach using a computer [Statistical climate model of the sound velocity field for applied hydroacoustic research. Computer-based approach]. Proc. of Makarov Pacific Higher Naval College. Vladivostok, 1989, vol. 1, p. 35–36.
5. Luger D.F. Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems. M., Williams Publ., 2005, 864 p.
6. Matvienko V.N., Tarasyuk Yu.F. The range of acoustical means [Range of hydroacoustic devices]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981, 208 p.
7. On the approval of the Strategy for the development of maritime activities of the Russian Federation until 2030. Decree of the Government of the Russian Federation of December 8, 2010, N 2205-r. URL: <https://rg.ru/2010/12/21/mordeyatelnost-site-dok.html> – 10.08.2017.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Technology low-frequency nonlinear hydroacoustics and neuro-fuzzy operations in pattern recognition of marine objects [Technologies of non-linear translucent hydroacoustics and neuro-fuzzy operations in problems of recognition of marine objects]. Vladivostok, DVFU Publ., 2016, 190 p.
9. Jimenez L.A.T., Mayen H.G., Arteagoitia O.B., Garza D., Torres R. System for acoustic detection and autonomous classification of targets in the sea (SIDACAM). Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 137–144.
10. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics. Berlin and New York, 2001, 501 p.
11. Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E. A passive acoustic localization system for broadband sources. Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 341–348.
12. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Raspoznavanie i klassifikaciya istochnikov formirovaniya polej razlichnoj fizicheskoj prirody v morskoy srede [Recognition and classification of the sources of the formation of fields of different physical nature in the marine environment]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2017. 255 p.
13. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Nejrosetevye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah

- obnaruzheniya i operativnoj identifikatsii morskikh celej [Neural network technologies in intelligent detection systems and operational identification of marine targets]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2018. 263 p.
14. Patent № 2659100 RF Sposob formirovaniya i primeneniya shirokomasshtabnoy radiogid-roakusticheskoy sistemy monitoringa, raspoznavaniya i klassifikatsii poley, generirue-mykh istochnikami v morskoy srede [large-scale radio-hydro acoustic system formation and application method for monitoring, recognizing and classifying the fields generated by sources in the marine environment]: / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Mironenko M.V. Opubl. 28.06.2018.
 15. Pyatakovich V.A. Sistema klassifikatsii morskikh tseley na baze neyrosetevykh tekhnologiy [Marine target classification system based on neural network technologies] / Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 169–176.
 16. Pyatakovich V.A., Pyatakovich N.V., Pashkeev S.V. Raschet effektivnosti sredstv nablyudeniya kak informatsionnykh istochnikov ekspertnoy intellektual'noy sistemy kontrolya morskikh akvatoriy [Calculation of the effectiveness of observation as information sources of the expert intelligent control system for marine areas] // Strategicheskaya stabil'nost'. – M.: 2018. № 3 (84). – S. 43–48.
 17. Rudakov K. V. O metodakh optimizatsii i monotonnoy korrektsii v algebraicheskom podkhode k probleme raspoznavaniya [About the methods of optimization and monotone correction in the algebraic approach to the problem of recognition] / K. V. Rudakov, K. V. Vorontsov // Doklady RAN. – 1999. – T. 367. – № 3. – S. 314–317.
 18. Eshbi U. R. Vvedenie v kibernetiku [Introduction to Cybernetics] / U. R. Eshbi. – M: Inostrannaya literatura, 1959. – 432 s.
 19. Zamkov O. O. Matematicheskie metody v ekonomike [Mathematical methods in Economics] / O. O. Zamkov, A. V. Tolstopyatenko, Yu. N. Cheremnykh. – M.: «Delo i Servis», 1999. – 366 s.
 20. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Obuchenie neyronnoy seti kak etap razrabotki ekspertnoy sistemy dlya klassifikatsii istochnikov fizicheskikh poley pri monitoringe akvatoriy [Neural network training as a stage in the expert system development to classify the sources of physical fields when monitoring water areas] // Vestnik In-zhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. – Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2017. № 3(32). S. 138–149.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Пятакович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062, Russia. e-mail: pva.877com@mail.ru

Виктория Феликсовна Рычкова, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности. Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities. Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st. 690059. Vladivostok, Russia. e-mail: rychkova@msun.ru

Евгений Геннадьевич Филиппов, старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и электротехники, Дальневосточный федеральный университет. 690922, Россия, Приморский край, о. Русский. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

Evgenii G. Filippov, Senior Lecturer, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Far Eastern Federal University. Russian island 690922, Primorsky Krai, Russia. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.026

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

Расчет эффективности классификации целей интеллектуальной системой ВМФ, использующей комплекс вычислительных операций нейронных сетей

В.А. Пятакович¹, В.Ф. Рычкова², Е.Г. Филиппова³, Н.В. Пятакович¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ³АО «Союз-Ремонт»

Аннотация. В данной статье рассмотрены показатели эффективности и предложена методология оценки радиогидроакустических средств при использовании их в общей структуре системы мониторинга, распознавания и классификации полей, генерируемых источниками в морской среде. Особенностью системы является привлечение аппарата нечеткой логики для решения задач классификации объектов нейросетевой экспертной системы совместно со спектральными линиями анализа приемного тракта разрабатываемой радиогидроакустической системы мониторинга морских акваторий с последующим комплексным анализом результатов в едином информационно-аналитическом центре. Результаты научных разработок авторов по данной тематике защищены патентами, изданы в виде монографий и отражены в научных статьях. Приведен расчет показателей эффективности обнаружения морской цели (надводного корабля, подводной лодки, специального морского аппарата) при различных условиях. Рассмотрены выражения показателя эффективности гидроакустических средств для различных видов функций полезности и аппроксимации характеристик обнаружения стандартным нормальным распределением. Реализация разрабатываемого комплекса вычислительных операций нейронных сетей на многопроцессорных нейроподобных сверхбольших интегральных схемах в виде нейросетевой экспертной системы для распознавания и классификации измеряемых информационных полей морских объектов системой мониторинга морских акваторий, обеспечит возможность решения многофункциональных задач морской науки и оборонного комплекса государства.

Ключевые слова: классификация морских объектов, нечёткая логика, нейронные сети, гидрофизические поля, системы автоматического управления.

The calculation of classification efficiency of targets of the unintelligent navy system using complex of computing operations of neural networks

Valeriy A. Pyatakovich¹, Victoria F. Rychkova², Alina V. Filippova³, Natalia V. Pyatakovich¹¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi,³Joint-Stock Company «Souz-Remont»

Abstract. In this article, the efficiency indicators are considered and a methodology for estimating radio-hydroacoustic means is proposed when using them in the overall structure of the monitoring system, recognition and classification of fields generated by sources in the marine environment. The peculiarity of the developed system is of fuzzy logic to solve problems of object classification by the neural network expert system in conjunction with spectral lines of analysis of the receive path of the developed radio-hydroacoustical system for the monitoring of sea waters, with subsequent comprehensive analysis of results at an integrated Information and Analytical center. The results of scientific research of the authors on this topic are protected by patents and published in the form of monographs and scientific articles. The article discusses the study of factors that affect the functionality of the marine monitoring system with elements of artificial intelligence and influence detection and recognition that make up the process of identifying a marine target. The effectiveness of detecting a marine target (a surface ship, a submarine, a special marine apparatus) under various conditions has been calculated. Expressions to calculate the effectiveness of hydroacoustic means for various utility functions and approximation of detection characteristics using standard normal distribution are presented. The practical implementation of the system that is developed for executing the computing operations by way of neural networks on the multiprocessor neural VLSI circuits in the form of a neural network expert system for the identification and classification of measured information fields of sea objects as part of the sea waters' monitoring system will provide the ability to solve multi-functional problems of marine science and of the defense industry of the State.

Key words: classification of sea objects, fuzzy logic, neural networks, training algorithms of neural networks, automatic control systems.

Введение

Основной целью научно-технических авторских разработок является создание глобальной системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы, построение нейросетевой экспертной системы распознавания в общей структуре просветной системы мониторинга включая комплекс ее автоматизированного управления на основе разработанных архитектур искусственных нейронных сетей и методики их обучения для решения задач распознавания (классификации)

технических источников информационных полей в морской среде [1, 2, 4–12].

В общей структуре системы мониторинга, распознавания и классификации полей, генерируемых источниками в морской среде при информационном обеспечении, используются радиогидроакустические средства добывания сведений в реальном масштабе времени с высокими точностями местоположения и пространственного разрешения объектов наблюдения. Они реализуют активные и пассивные принципы работы, осуществляя мониторинг океаносферы в широком

диапазоне частотного спектра электромагнитных и акустических колебаний. Эффективность решения координатных задач объектов наблюдения при дистанционном мониторинге будет зависеть от качества динамических моделей физических полей, инженерно-технических решений и характеристик видов техники.

Одним из средств, обеспечивающих повышение эффективности функционирования систем морского мониторинга, является создание методологии как стратегии исследования на основе научных методов обоснования решений, которые призваны устранить противоречия, возникающие между выдвигаемыми требованиями к таким системам и возможностями их достижения. Максимальная эффективность применения средств освещения обстановки достигается, как правило, при комплексном использовании стационарных и автономных средств обнаружения с учетом их показателей эффективности.

Неотъемлемым условием технической реализации и эффективности эксплуатационного использования системы является возможность интеграции и обработки в реальном масштабе времени многомерной регистрируемой информации линиями спектрального, корреляционного и нейросетевого анализа (применение новых четких и нейро-нечетких методов в системе обработки образов) информационно-аналитического центра (ИАЦ).

1. Практическая значимость создаваемой радиогидроакустической системы [2, 3, 12–20] освещения обстановки и мониторинга полей различной физической природы заключается в решении функционально связанных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов Российского государства.

Надежность и стойкость системы к определенным внешним воздействиям

Большое значение в процессе эксплуатации радиогидроакустических средств (РГАС) системы морского мониторинга имеет уровень их восстанавливаемости. По этому признаку РГАС подразделяются на восстанавливаемые, или средства непрерывного, многократного и периодического использования, и восстанавливаемые, т.е. средства разового применения. Подлежат восстановлению, как правило, неавтономные средства, т.е. те средства, ремонт которых требует меньших затрат, чем замена, хотя в последнее время все большее распространение приобретает восстановление работоспособности технических средств агрегатным способом, т.е. путем замены отдельных узлов, модулей и целых блоков исправными.

Возможности систем пребывать в работоспособном состоянии с достаточной полнотой характеризуются их надежностью. В это понятие включаются свойства безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости и восстанавливаемости. Количественные характеристики надежности хотя и учитывают свойства внешней среды, но, как правило, не отражают реакцию систем на экстремальные воздействия, т.е. их стойкость. Для совместного учета надежности систем и стойкости их к

определенным внешним воздействиям в не которой конкретной ситуации вводят понятие «живучесть».

Однако не все свойства системы охватываются этими двумя терминами, поэтому вводят понятие «качество» – совокупность указанных в технических условиях свойств системы, характеризующих пригодность системы к функциональному (в процессе работы системы мониторинга) и техническому обслуживанию, транспортировке, ремонту и т.д.

Перечисленные характеристики не отражают весь перечень вопросов использования системы во всем многообразии условий (гидроакустических, климатических и др.), так как относятся к так называемым внутренним свойствам систем. Восполнить этот пробел, т.е. отразить количественное соответствие априорных (расчетных) или апостериорных (фактических) результатов ожидаемым или заданным тактическим характеристикам в конкретных условиях, и призвана такая характеристика, как эффективность.

Следовательно, в отличие от надежности и качества, эффективность должна характеризовать не только внутренние свойства технических систем, но и то, как они эксплуатируются в заданных условиях для достижения определенной цели.

Практическая ценность такой оценки будет определяться тем, насколько рационально выбраны ее критерии и показатель. До настоящего времени, к сожалению, не существует не только общепринятых подходов к оценке эффективности, но даже терминологию этой характеристики нельзя считать установившейся. Необходимо отметить, что попытки внедрить количественную оценку эффективности в практику эксплуатации предпринимались. В систему так называемых качественных показателей вводятся результаты эксплуатационного использования РГАС, т.е. тактические параметры, полученные фактически или расчетным путем, а также их потенциальные значения. Однако очевидные недостатки этой системы оценок не только не позволяют получать от нее практическую пользу, но в некоторых случаях приводят к неверным выводам и рекомендациям.

Радиогидроакустическое обеспечение функционирования системы морского мониторинга и ее информационно-аналитического центра помимо общих организационно-технических мероприятий по эксплуатации предусматривает выполнение развёртывания элементов системы наблюдения для своевременного освещения подводной и надводной обстановки в интересах задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов Российского государства.

Под термином (система наблюдения) примем совокупность однородных или разнородных технических средств наблюдения, объединенных функциональным единством решаемых задач, характеризуемая той или иной структурой построения и взаимного расположения составляющих ее элементов.

Освещение обстановки – это получение и отображение в том или ином виде на основе сбора, обработки и обобщения информации о морских объектах в ИАЦ, находящихся в пределах зоны обзора средств наблюдения. Систему радиогидроакустического наблюдения в зависимости от характера решаемых задач и обстановки образуют

акустические, радиолокационные средства и средства обнаружения по другим физическим полям морских технических объектов (МТО) [2, 3, 9, 14].

Радиогидроакустическое наблюдение включает ряд самостоятельных этапов, основными из которых являются поиск, обнаружение и классификация МТО, определение и сопровождение МТО по пространственным координатам, обеспечение передачи информации средствами гидроакустического подавления. Кроме того, РГАС системы автоматизированного мониторинга решают задачи обеспечения гидроакустической связи, опознавания и навигационной безопасности. Эффективность каждого этапа, реализуемого средствами, определяет в целом и эффективность системы.

Оценка эффективности средств, входящих в РГАС системы автоматизированного мониторинга, осуществляется на основе выбранного критерия (системы критериев) показателем (совокупностью показателей), численно характеризующим его реализуемость. Основным содержанием РГАС системы автоматизированного мониторинга является обеспечение высокой эффективности применения ее по прямому назначению, т. е. получение максимального значения показателя эффективности в совокупности заданных условий. При этом предполагается, что МТО находится в зоне обзора.

В самом общем случае процесс обнаружения МТО определяется двумя последовательными и относительно независимыми событиями – встречи носителя средств обнаружения (наблюдателя) с целью и установления энергетического контакта с ней [1, 4–6]. В соответствии с данным положением вероятность обнаружения МТО определится соотношением

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{вх}} P_{\text{к}} \quad (1)$$

где $P_{\text{вх}}$ – вероятность вхождения МТО в зону обзора средства наблюдателя»

$P_{\text{к}}$ – вероятность установления контакта с ней.

Вероятность $P_{\text{вх}}$ выступает в качестве показателя эффективности тактического поиска МТО наблюдателем, а $P_{\text{к}}$ – показателем эффективности обнаружения цели, находящейся в зоне обзора средства наблюдения. Максимизация вероятности $P_{\text{вх}}$ относится к прерогативе теории эксплуатационного использования РГАС, а повышение вероятности $P_{\text{к}}$ является одной из основных задач радиогидроакустического обеспечения.

Таким образом, РГАС системы мониторинга является составной частью эксплуатационного использования системы автоматизированного морского мониторинга и преследует цель оптимизации режимов работы средств в интересах получения экстремальных значений выбранных показателей эффективности.

После испытаний, длительной автономной эксплуатации и т.д., возникает необходимость в оценке эффективности РГАС для окончательного решения о включении их в состав системы морского мониторинга (апостериорный аспект оценки эффективности средств). Современные радиогидроакустические средства являются

средствами многообразного действия, предназначены для решения широкого круга задач и построены по иерархическому принципу [2, 7, 14]. Оценка эффективности таких систем также должна подчиняться иерархическому принципу и базироваться на положениях системотехники.

Основой системотехнического подхода при оценке эффективности сложных автоматизированных систем является учет взаимозависимости и взаимообусловленности целого комплекса факторов [2, 16–19] и оптимизация состава РГАС их режимов работы на основе количественных оценок. Исходя из принципов системотехнического подхода последовательность действий при оценке эффективности радиогидроакустических средств системы мониторинга сводится к следующему:

- анализу задач, возлагаемых на РГАС, условий их применения и определению совокупности исходных данных;
- выбору критерия (критериев) и показателей эффективности;
- разработке математической модели функционирования систем;
- производству расчетов и выработке предложений по составу РГАС в системе мониторинга и определению оптимальных режимов эксплуатационного и технического обслуживания средств.

Подобная последовательность действий является обязательной для систем любого уровня иерархии, но объем работы по каждому этапу будет разным. Оценка эффективности начинается с анализа задач, возлагаемых на РГАС, и условий их применения в общей структуре системы морского мониторинга.

Особое внимание уделяется характеристике гидроакустических районов и акустических свойств МТО. Количественная оценка эффективности РГАС требует выбора математических моделей функционирования» связывающих тактические параметры с техническими характеристиками аппаратуры. Общих способов построения моделей не существует. В каждом конкретном случае модель выбирается исходя из целевой направленности исследования и степени сложности системы (региональная, широкомасштабная, глобальная и т.д.).

В зависимости от сложности системы уровня иерархии и задач исследования может быть использован математический аппарат различной сложности. Математические модели с вычислительной точки зрения подразделяются на аналитические, статистические и смешанные, а по степени полноты учета случайных факторов – регулярные, квазирегулярные и случайные. Каждый из рассмотренных типов моделей имеет свои достоинства и недостатки. Аналитические модели являются сравнительно грубыми, учитывают небольшое число факторов и правомерны, как правило, при определенных ограничениях.

Достоинством этих моделей является простота, наглядность и возможность физической интерпретации результатов исследования. Статистические модели более точны и подробны, учитывают практически неограниченно большое число факторов. Однако данные методы не

позволяют производить интерпретацию результатов, громоздки, требуют большего расхода времени.

Наилучше результаты получаются при совместном применении аналитических и статистических моделей. Примером совместных моделей является расчет коэффициента концентрации антенн, амплитуды и фазы возбуждения элементов, которых задается статистически. Регулярные модели используют строго детерминированные параметры.

Примером является уравнение дальности, в которое входит величина порогового значения коэффициента распознавания. К квазирегулярным моделям можно отнести вероятностные характеристики обнаружения, полученные на базе статистической теории обнаружения и случайных выбросов. В данных моделях вероятностный характер носит отношение сигнал/помеха. Примером использования статистических моделей для оценки эффективности РГАС является получение законов распределения параметров, определяющих потенциал обнаружения уравнения дальности для различных режимов работы. Данная модель достаточно подробно рассматривается в настоящей работе.

Конечной целью оценки эффективности РГАС является разработка рекомендаций по применению на основе расчетов показателей эффективности при решении поставленных задач. Рассмотрим показатели эффективности более подробно.

Показатели эффективности РГАС

Эффективность применения РГАС по назначению объективно характеризуется совокупностью тактических $\{\alpha_i\}$,

$i = \overline{1, n}$ и технических $\{\beta_v\}$, $v = \overline{1, l}$ параметров. Кроме того, на конечные результаты применения средств оказывают влияние условия $A_{f,j}$, $j = \overline{1, L}$ и способы применения $\{B_p\}$, $p = \overline{1, k}$.

Формально это можно представить так:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}[\{\alpha_i\}, \{\beta_v\}, \{A_{f,j}\}, \{B_p\}]. \quad (2)$$

Каждый тактический параметр, входящий в совокупность $\{\alpha_i\}$, определяется совокупностью технических параметров $\{\beta_v\}$.

Под условиями применения будем понимать состояние радиолокационной наблюдаемости, гидроакустические условия района применения средств, реализацию приема сигналов на фоне естественных или искусственных помех; под способами – одиночное применение или совместно со средствами других носителей. Представление (2) в виде единого аналитического выражения является весьма сложной задачей, что вынуждает при оценке эффективности прибегать к разумным упрощениям.

Рассмотрим некоторый тактический параметр α_i (дальность обнаружения, точность определения координат и т. д.), характеризующий результат применения средств по назначению. И з-за случайности целого ряда определяющих факторов этот параметр является случайным.

Пусть $F(x)$ функция распределения вероятности параметра, где x – значения, принимаемые величиной α :

$$F(x) = F[x/\{\beta_v\}, \{A_{f,j}\}, \{B_p\}]. \quad (3)$$

Выражение (3) представляет функцию распределения по совокупности технических параметров, условий и способов применения. В дальнейшем перечисленные совокупности обозначим y_1, y_2, y_3 :

$$F(x) = F(x/y_1, y_2, y_3). \quad (4)$$

Обозначим через G множество возможных значений $F(x)$, обусловленное совокупностью y_1, y_2, y_3 .

Тогда задача выбора показателя эффективности сводится к установлению некоторого порядка предпочтения на множестве G , т.е. к выбору а этом множестве функционала $\mathcal{E}(F)$, обладающего свойством $\mathcal{E}(F_1) \geq \mathcal{E}(F_2)$, тогда и только тогда, когда функция распределения F_1 , предпочтительнее или равноценна функции F_2 .

Вообще говоря, функционал $\mathcal{E}(F)$ может строиться и из условия $\mathcal{E}(F_1) \leq \mathcal{E}(F_2)$, когда F_1 предпочтительнее или равноценна F_2 . Все зависит от конкретного смысла параметра α . Например, дальность обнаружения целей желательно максимизировать, т.е. для построения $\mathcal{E}(F)$ необходимо использовать первое условие, а ошибку определения координат - минимизировать и в этом случае применить второе условие.

Если на множестве G существует ограниченный функционал $\mathcal{E}(F)$, обладающий свойствами $\mathcal{E}(\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k F_k) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \mathcal{E}(F_k)$ для любой последовательности чисел $\lambda_k \geq 0$, $\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k = 1$ и $\mathcal{E}(F_1) \geq \mathcal{E}(F_2)$, тогда и только тогда, когда F_1 предпочтительнее или равноценна F_2 , [2, 16] то доказывается, что $\mathcal{E}(F)$ имеет вид:

$$\mathcal{E}(F) = \int_{(\alpha)} L(x) dF(x). \quad (5)$$

Здесь $L(x)$ – функция полезности, характеризующая поставленную задачу, а функция $F(x)$ – достигаемые результаты.

Выражение (5) представляет собой математическое ожидание функции полезности относительно распределения вероятностей $F(x)$.

С точки зрения оценки эффективности РГАС с учетом возможности их применения в условиях $\{A_{f,j}\}$ и способах $\{B_p\}$ выражение (5) необходимо переписать:

$$\mathcal{E}(F) = \int_{(\alpha)} L(x) dF(x/y_1, y_2, y_3). \quad (6)$$

Из (6) видно, что функционал $\mathcal{E}(F)$ определяет одновременно с отношением предпочтения на множестве G соответствующее отношение предпочтения на множестве возможных значений технических параметров β_v , условий $A_{f,j}$ и способов применения.

Общие выражения (5) и (6) справедливы и тогда, когда параметр α , характеризующий результат применения средства, является не случайной, а детерминированной величиной.

В этом случае в выражениях (5) и (6) необходимо использовать функцию распределения для детерминированной величины, рассматриваемой как частный вид случайной величины. Эта функция распределения для конкретных значений $\beta_v, A_{f,j}, B$ будет иметь вид:

$$F(x/y_1, A_{f,j}, B) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x^*(y_1, A_{f,j}, B); \\ 1 & \text{при } x \geq x^*(y_1, A_{f,j}, B), \end{cases}$$

где $x^*(y_1, A_f, B)$ – значение детерминированной величины для совокупности детерминированных значений технических параметров β и «заданных условий A_f и способов использования B . В соответствии с выражением (5) показатель эффективности определится выражением

$$\mathcal{E}(F) = L(x^*/y_1, A_f, B). \quad (7)$$

Нахождение функции $F(x/y_1, y_2, y_3)$ в зависимости от совокупности, y_2, y_3 является весьма сложной задачей.

Конкретизируем условия и способы применения средства, т.е. выберем конкретные значения A_f и B . Случайность величины x обуславливается флюктуациями значений технических параметров β . Тогда в соответствии с общими соотношениями (5) и (6) оценка эффективности РГАС сводится к нахождению экстремальных значений показателя

$$\mathcal{E}^*(F) = \max_{\min} \{ \mathcal{E}(x/y_1, A_f, B) \}. \quad (8)$$

Формула (8) означает, что $\mathcal{E}^*(F)$ есть максимальное (минимальное) значение функции $\mathcal{E}(F)$, вычисленное по совокупности случайных значений y_1 при заданных условиях и способах применения средств.

Расчет показателя (8) предполагает, что функция полезности задана в соответствии с требованиями внешней обстановки, например, требованиями оружия носителя.

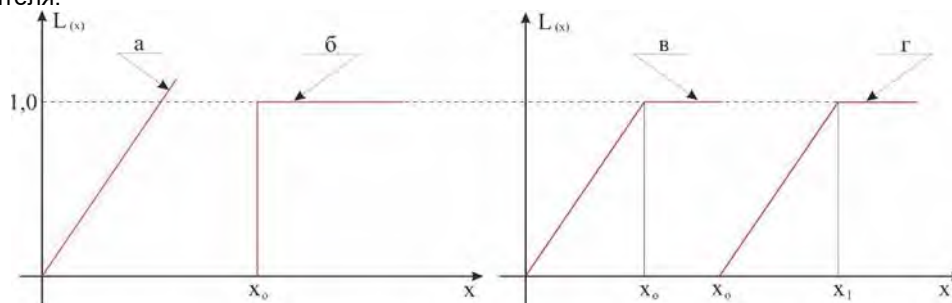


Рис. 1. Некоторые типичные функции полезности

При функции $L(x)$ решение задачи, возлагаемой на средство, обеспечивается, если реализуется значение параметра x не менее, чем x_0 , поскольку превышение этого значения дополнительного эффекта не дает.

В соответствии с (5) получим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(F) &= \int_{x \geq x_0} dF(x/y_1, A_f, B) \\ &= \text{Вер.}(\alpha \geq x_0/y_1, A_f, B). \end{aligned} \quad (10)$$

Следовательно, показателем эффективности выступает вероятность события $\alpha \geq x_0$.

Рассмотрим в качестве параметра x дальность обнаружения цели. Тогда при $x_0 = D_0$

$$\mathcal{E}(F) = \mathcal{E}(D) = \int_{D_0}^{\infty} dF(x/y_1, A_f, B) = P(D \geq D_0). \quad (11)$$

здесь получили величину показателя эффективности. Если в качестве параметра α взять точность определения угловой координаты $\Delta\varphi$, то из физических соображений ясно, что функция полезности $L(x)$ будет зеркальной относительно функции (8). Для показателя эффективности получи

Рассмотрим некоторые частные случаи показателей эффективности, вытекающие из их общего вида. При этом будем оперировать одномерной функцией распределения параметра x , так как для многомерной функции $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ соответствующие выражения получаются аналогичным образом.

Пусть $L(x) = x$ при всех x , т.е. $L(x)$ – линейная функция (рис. 1, а), при которой эффект применения различных РГАС в системе автоматизированного морского мониторинга равномерно увеличивается по мере роста достигаемого параметра x .

Из выражения (6) получаем:

$$\mathcal{E}(F) = \int_{(\alpha)} x dF(x/y_1, A_f, B) = \bar{\alpha}(y_1, A_f, B) \quad (9)$$

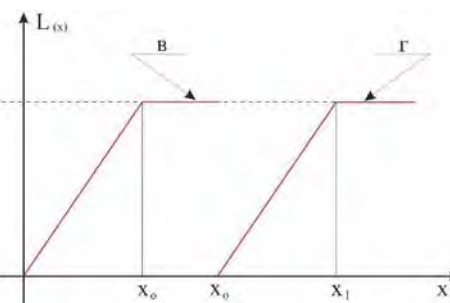
где $\bar{\alpha}(y_1, A_f, B)$ математическое ожидание величины α с функцией распределения $F(x/y_1, A_f, B)$.

Таким образом, показателем эффективности является математическое ожидание случайной величины α , характеризующей результат применения.

Пусть $L(x)$ имеет вид ступенчатой функции (см.рис.1, б.) тогда

$$L(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_0; \\ 1 & \text{при } x \geq x_0, \end{cases}$$

где x_0 – некоторая заданная величина.



$$\mathcal{E}(F) = \int_0^{x \leq \Delta\varphi_0} dF(x/y_1, A_f, B) = P(\Delta\varphi \leq \Delta\varphi_0). \quad (12)$$

Величина показателя (12) определяет вероятность того, что точность определения координат не меньше некоторой заданной $\Delta\varphi_0$.

Рассмотрим функцию полезности, изображенной на рис.1, в. Аналитическое выражение для такой функции, называемой линейной функцией с насыщением, будет иметь вид:

$$L(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0; \\ x/x_0 & \text{при } 0 \leq x \leq x_0; \\ 1 & \text{при } x \geq x_0, \end{cases}$$

где x_0 значение параметра x , при котором наступает насыщение.

Подставляя это выражение в (6), получим:

$$\mathcal{E}(F) = \frac{1}{x_0} \int_0^{x_0} x dF(x/y_1, A_f, B) + \int_{x_0}^{\infty} dF(x/y_1, A_f, B) =$$

$$= \frac{\bar{x}_{\text{усл}}(y_1, A_f, B)}{x_0} p(x < x_0/y_1, A_f, B) + p(x > x_0/y_1, A_f, B),$$

где

$$\bar{x}_{\text{усл}}(y_1, A_f, B) = \frac{1}{F(x_0/y_1, A_f, B)} \int_0^{x_0} x dF(x/y_1, A_f, B)$$

– условное математическое ожидание величины x при условии $x < x_0$;

$$p(x < x_0/y_1, A_f, B) = F(x_0/y_1, A_f, B);$$

$$p(x \geq x_0/y_1, A_f, B) = 1 - F(x_0/y_1, A_f, B).$$

В рассматриваемом случае показатель эффективности уже нельзя трактовать так просто, как это имело место при линейной и ступенчатой функциях полезности.

Функция полезности $L(x)$, изображенная на рис. 1, г, называется линейной функцией с насыщением и задержкой роста. Для этой функции характерно наличие двух уровней: x_0 , до которого результат применения равен нулю, и уровня x_1 , после которого наступает «насыщение».

В пределах же уровней $x_0 - x_1$ эффект применения нарастает по линейному закону от нуля до единицы. Аналитическое выражение для $L(x)$ в этом случае равно

$$L(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_0; \\ \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} & \text{при } x_0 \leq x \leq x_1; \\ 1 & \text{при } x \geq x_1. \end{cases}$$

После подстановки этого соотношения в (6) находим:

$$\mathfrak{E}(F) = \frac{\bar{x}_{\text{усл}}(y_1, A_f, B)}{x_1 - x_0} p(x_0 \leq x \leq x_1/y_1, A_f, B) + p(x \geq x_1/y_1, A_f, B),$$

где

$$\bar{x}_{\text{усл}}(y_1, A_f, B) = \frac{1}{F(x_1/y_1, A_f, B) - F(x_0/y_1, A_f, B)} \int_{x_0}^{x_1} x dF(x/y_1, A_f, B)$$

условное математическое ожидание величины x при условии $x_0 \leq x \leq x_1$;

$$p(x_0 \leq x \leq x_1/y_1, A_f, B) = F(x_1/y_1, A_f, B) - F(x_0/y_1, A_f, B), p(x \geq x_1/y_1, A_f, B) = 1 - F(x_1/y_1, A_f, B).$$

Следует подчеркнуть, что рассмотренные виды функций полезности и соответствующих показателей эффективности не исчерпывают возможного их многообразия, но представляются наиболее типичными в практически интересных случаях.

Конкретный вид функции полезности, количественно характеризующий цель, поставленную перед РГАС, можно определить, рассмотрев показатель эффективности системы более высокого иерархического уровня. Использование функций полезности вида линейной и линейной с насыщением целесообразно при оценке эффективности радиогидроакустических средств, входящих в систему морского мониторинга для обеспечения навигационной безопасности, обнаружения воздушных, надводных и подводных МТО.

В тех случаях, когда выбор функции полезности по показателю эффективности системы более

высокого иерархического уровня невозможен (например, и з-за отсутствия аналитического выражения для этого показателя), то функция $L(x)$ задается интуитивно из общих соображений или методом экспертных оценок.

Прерогатива в задании функции полезности принадлежит командному уровню (оператору), т. е. будем полагать, что функция $L(x)$ задана изначально.

Рассмотренные выше соотношения для показателя эффективности вида (5) или (6) были правомерны для одномерной функции распределения параметра α соответственно и функции полезности $L(x)$. Однако использование одномерных функций $L(x), F(x)$ оказывается недостаточным когда речь идет об оценке эффективности, обеспечения надежности системы и т.д. [2, 14] В этих случаях необходимо определение многомерных функций $L(x_1, x_2, \dots, x_n), F(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Например, дальности и точности определения дистанции, точности определения угловой координаты и разрешающая способность по углу жестко между собой связаны. Следовательно, необходимо определение $F(D, \Delta D, \Delta \Pi, \Delta \varphi)$.

Необходимо подчеркнуть, что основной и наиболее трудоемкой задачей при вычислении показателей эффективности является разработка и реализация алгоритма вычисления функции $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. или хотя бы ее параметров σ_x^2, \bar{x} .

Расчет показателей эффективности обнаружения МТО при различных условиях

Количественная оценка эффективности ГАС требует выбора математических моделей функционирования связывающих тактические параметры с техническими характеристиками аппаратуры.

Общих способов построения моделей не существует. В каждом конкретном случае модель выбирается исходя из целевой направленности исследования и степени сложности системы. В зависимости от сложности интеллектуальной системы, уровня иерархии и задач исследования может быть использован математический аппарат различной сложности. Математические модели с вычислительной точки зрения подразделяются на аналитические, статистические и смешанные, а по степени полноты учета случайных факторов – регулярные квазирегулярные и случайные.

Каждый из типов моделей имеет свои достоинства и недостатки. Аналитические модели являются сравнительно грубыми, учитывают небольшое число факторов и правомерны как правило при определенных ограничениях. Достоинством этих моделей является простота, наглядность и возможность физической интерпретации результатов исследования. Статистические модели более точны и подробны учитывают практически неограниченно большое число факторов.

Однако данные методы не позволяют производить интерпретацию результатов, громоздки, требуют большего расхода времени. Наилучше результаты получается при совместном применении аналитических и статистических моделей [2]. Примером совместных моделей является расчет коэффициента концентрации антенн, амплитуды и

фазы возбуждения элементов, которых задаются статистически. Регулярные модели используют строго детерминированные параметры. Примером является уравнение дальности, в которое входит величина порогового значения коэффициента распознавания. К квазирегулярным моделям можно отнести вероятностные характеристики обнаружения, полученные на базе статистической теории обнаружения и случайных выбросов.

В данных моделях вероятностный характер носит отношение сигнал / помеха. Тракты гидроакустических комплексов (ГАК) подводных технических объектов исследуются с использованием теории автоматического регулирования, марковских процессов, а стационарные системы освещения обстановки – теории массового обслуживания.

Примеры использования статистических моделей для оценки эффективности ГАС является получение законов распределения параметров, определяющих потенциал обнаружения уравнения дальности для различных режимов работы. Рассмотрим показатели эффективности несколько подробнее.

В соответствии с общим выражением $\mathcal{E}(F) = \int_{(\alpha)} L(x) dF(x)$, представляющим собой математическое ожидание функции полезности относительно распределения вероятностей $F(x)$, где $L(x)$ – функция полезности, характеризующая поставленную задачу, а функция $F(x)$ – достигаемые результаты, конкретное значение показателя эффективности может быть получено при условии задания функции полезности $L(D)$ и функций $F(D)$ или $f(D)$. Вид функции полезности определяется требованиями эффективного использования технических средств и оружия МТО.

Основной и наиболее трудоемкой задачей при вычислении показателя эффективности является разработка и реализация алгоритма определения функций $F(D)$, $f(D)$ или хотя бы параметров этих функций, если они не получены на основе специальных экспериментальных исследований. Покажем возможность получения плотности распределения вероятности дальности обнаружения аналитическим путем.

Пусть МТО, сближается с производящим распознавание объектом (наблюдателем) на курсовом параметре 0. Текущее расстояние между наблюдателем и МТО изменяется в соответствии с зависимостью

$$D = D_0 - v_p t, \tag{13}$$

где D_0 – дистанция в момент $i = 1 (t = 0)$.

Номер обзора N ГАС, при котором произошло обнаружение, является дискретной случайной величиной, характеризуемой законом распределения

$$f_N(n) = P\{N = n\}, \tag{14}$$

где n – текущий номер обзора.

Если правило принятия решения (1), то вероятность того, что обнаружение произошло именно на n -м цикле обзора, будет равна:

$$f_N(n) = P(D_n) \prod_{i=1}^{n-1} [1 - P(D_i)]. \tag{15}$$

Другой вероятностной характеристикой случайной величины является ее функция распределения, т.е. вероятность того, что $N \leq n$

$$\begin{aligned} P\{N \leq n\} &= \sum_{i=1}^n P\{N = i\} \\ &= \sum_{i=1}^n f_N(i) = \sum_{i=1}^n P(D_n) \prod_{i=1}^{n-1} [1 - P(D_i)] = \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(D_i)]. \end{aligned} \tag{16}$$

Перейдем от случайной величины N , определяющей номер обзора, на котором произошло обнаружение, к случайному времени t_0 , определяющему момент обнаружения МТО

$$t_0 = NT_0. \tag{17}$$

Для значений n и t случайных величин N и t_0 имеем $t = nT_0$ и зависимость расстояния от времени может быть представлена в виде

$$D = f(t) = f(nT_0). \tag{18}$$

Зная закон распределения $f_N(n)$, найдем закон распределения дистанции, на которой произошло обнаружение МТО

$$f(D) = f_N(D) |\Psi'(D)|, \tag{19}$$

где $\Psi'(D)$ – функция, обратная функции $D = f(t)$. С учетом (3) и (7) получаем

$$f(D) = f_N(n) \frac{1}{v_p T_0} = \frac{P_{\text{перв}}(n)}{v_p T_0} = \frac{P_{\text{перв}}(D, D - \Delta D)}{D_{i+1} - D_i}. \tag{20}$$

Приведенное соотношение (20) позволяет находить функцию $f(D)$ при условии, что известны $P(D_i)$, $P_{\text{перв}}(D_i)$ или $P_n(D)$, заданные аналитически или графически.

Кроме того, должны быть известны период обзора и закон изменения расстояния со временем (номером обзора).

Аналогично можно найти закон распределения $f(D)$ для случая произвольного маневрирования МТО и других правил принятия решения об обнаружении. Сложность зависимости $f(D)$ вынуждает при оценке эффективности аппроксимировать ее относительно простой зависимостью, хорошо отражающей, действительный вид функции.

Если функция $f(D)$ напоминает кривую гауссового закона, то

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_D} \exp\left[-\frac{(D - \bar{D})^2}{2\sigma_D^2}\right] = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \exp[-h^2(D - \bar{D})^2] \tag{21}$$

где h и σ_D – параметры, характеризующие разброс дальностей и связанные между собой соотношениями;

$$h = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma_D}; \quad \sigma_D = \frac{1}{\sqrt{2} h}$$

При $D = \bar{D}$ ордината $f(\bar{D}) = f_{\text{max}}(\bar{D})$,

$$f_{\text{max}}(\bar{D}) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_D}.$$

Если обозначить ширину $f(D)$ на уровне $0,5f(\bar{D})$ как $d_{0,5}$ то

$$\begin{aligned} 0,5f(\bar{D}) &= \frac{h}{\sqrt{\pi} 2} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \sigma_D}; \\ h^2 &= \frac{2,8}{d_{0,5}^2}; \quad \sigma_D = 0,41d_{0,5}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$f(D) = \frac{0,97}{d_{0,5}} \exp \left[-\frac{2,8}{d_{0,5}^2} (D - \bar{D})^2 \right]. \quad (22)$$

После интегрирования (9) и (10) получим:

$$P(D) = 0,5 - \Phi \left[\frac{D - \bar{D}}{\sigma_D} \right] = 0,5 - 0,5 \Phi_0 \left[\frac{D - \bar{D}}{\sigma_D} \right]; \quad (23)$$

$$P(D) = 0,5 - \Phi \left[\frac{D - \bar{D}}{0,41 d_{0,5}} \right], \quad (24)$$

где

$$\Phi(z) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt; \quad \Phi_0(z) = 2\Phi(z)$$

Рассмотрим выражения показателя эффективности ГАС МТО для трех видов функций полезности $L(D)$ и аппроксимации $f(D)$ гауссовым законом:

$$\varepsilon = \int_{D^*}^{\infty} L(D) f(D) dD. \quad (25)$$

Если функция полезности имеет ступенчатый вид (рис. 2, кривая 1), то

$$\varepsilon = \int_{D^*}^{\infty} L(D) f(D) dD = P(D \geq D^*) = 0,5 - \Phi \left[\frac{(D^* - \bar{D})}{\sigma_D} \right]. \quad (26)$$

Функция полезности, изображенная на рисунке 2 (кривая 2), может быть представлена в виде

$$L(D) = \frac{D - (D^* - \Delta D)}{2\Delta D} = \frac{(D - \bar{D}) - (D^* - \bar{D}) + \Delta D}{2\Delta D}, \quad (27)$$

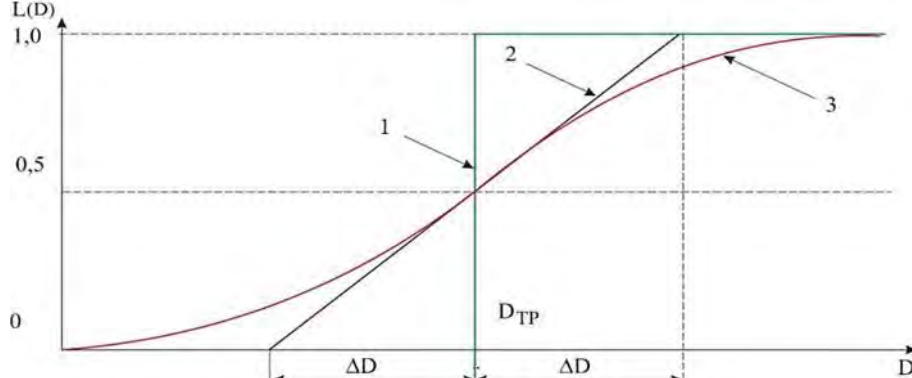


Рис. 2. Функция полезности к выводу выражений (27) и (28)

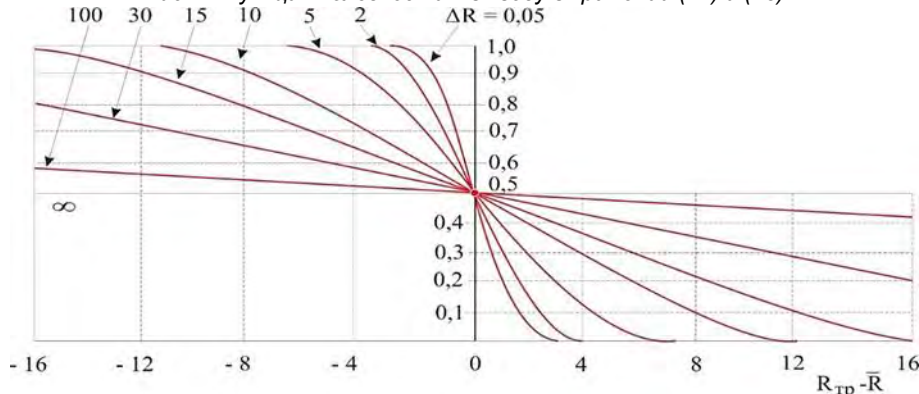


Рис. 3. Графики зависимости показателя эффективности $\varepsilon = \varepsilon [R^* - \bar{R}, \Delta R]$ для функции полезности вида (27)

Функция $L(D)$, представленная на рис. 2 (кривая 3), может быть аппроксимирована гауссовым законом:

$$L(D) = 0,5 \left[1 + \Phi \left(\frac{D - D^*}{\mu} \right) \right], \quad (29)$$

где ΔD – параметр функции $L(D)$, в пределах которого функция является линейной.

После интегрирования (25) с учетом (27) получаем

$$\varepsilon(D) = 0,5 - 0,5 \frac{R^* - \bar{R} + \Delta R}{2\Delta R} \Phi_0 [R^* - \bar{R} + \Delta R] + 0,5 \frac{R^* - \bar{R} - \Delta R}{2\Delta R} \Phi_0 (R^* - \bar{R} - \Delta R) - \frac{0,5}{\sqrt{2\pi} \Delta R} \left\{ \exp \left[-\frac{(R^* - \bar{R} - \Delta R)^2}{2} \right] - \exp \left[-\frac{(R^* - \bar{R} + \Delta R)^2}{2} \right] \right\}, \quad (28)$$

где $R^* - \bar{R} = \frac{D^* - \bar{D}}{\sigma_D}$ и $\Delta R = \frac{\Delta D}{\sigma_D}$.

Из (28) следует, что показатель эффективности ГАС в этом случае зависит от расхождения центров распределения функции $(f(D))$ и $(L(D))$. Эффективность системы максимальна, если $D^* \ll \bar{D}$, и равна 0 при $D^* \gg \bar{D}$. При $D^* = \bar{D}$ $\varepsilon = 0,5$. Во всех остальных случаях эффективность системы изменяется в соответствии с зависимостью (28).

При $\Delta D = 0$ функции $L(D)$ превращается в ступенчатую и формула (28) переходит в (27). При $\Delta D = D$ линейная функция $L(D)$ принимает форму прямой, параллельной оси D и проходящей на уровне 0,5.

Кривые, выражающие зависимость (28) $\varepsilon = \varepsilon [R^* - \bar{R}, \Delta R]$ представлены на рис. 3.

где $D^* = D_{\text{тр}}$ – дальность, соответствующая центру распределения;

μ – параметр, характеризующий скорость нарастания $L(D)$ с увеличением D .

Параметры $D^* = D_{\text{тр}}$ и μ находятся из графика функции $L(D)$.

В частности, для параметра μ справедливо

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \left(\frac{dL(D)}{dD} \right)_{D=D^*}}. \quad (30)$$

После подстановки (29), (30) в (25) получаем выражение для показателя эффективности \mathcal{E} в виде

$$\mathcal{E} = \frac{0,5}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{(R - \bar{R})^2}{2} \right] \{1 + \Phi[\gamma(R - R^*)]\} dD,$$

где

$$R = D/\sigma_D; \quad \bar{R} = \bar{D}/\sigma_D; \quad R^* = R_{\text{тр}} = D^*/\sigma_D; \quad \gamma = \sigma_D/\mu.$$

В этом случае эффективность системы оказывается зависящей от трех параметров: средней относительной дальности первоначального обнаружения $\bar{R} = \bar{D}/\sigma_D$, средней относительной дальности центра распределения функции $L(D)$, $R^* = D^*/\sigma_D$ и соотношения между параметрами σ_D и μ .

Графическая зависимость $\mathcal{E}(\bar{R}, R^*)$ для значений $\gamma = 0,5; 5,0$ представлена на рис. 4.

Анализ графиков рисунка 4 позволяет сделать следующие выводы: увеличение разности $D_{\text{тр}} - D$ при фиксированном $\gamma = \sigma_D/\mu = \text{const}$ приводит к резкому снижению показателя эффективности; увеличение отношения $\gamma = \sigma_D/\mu$ при $R_{\text{тр}} = \text{const}$ сопровождается более крутым нарастанием показателя эффективности ГАС.

Отметим, что математическое описание процесса обработки информации с учетом действия оператора представляется весьма сложной задачей. При этом применение в процессе распознавания и классификации интеллектуальных систем с реализованным функционалом четкой и нечеткой логики [2, 6–12] для оценки результатов наблюдения позволит увеличить вероятность идентификации МТО в условиях неопределенности.

Заключение

Современные радиогидроакустические средства построены по иерархическому принципу и являются

средствами «многоразового действия» предназначенными для решения широкого круга задач. Оценка эффективности таких систем также должна подчиняться иерархическому принципу и базироваться на положениях системной инженерии. Основой системотехнического (Systems Engineering) подхода при оценке эффективности сложных интеллектуальных систем является учет взаимозависимости и взаимообусловленности целого комплекса факторов и оптимизация состава гидроакустических средств (систем) (ГАС) и режимов работы на основе количественных оценок. Исходя из принципов системотехнического подхода последовательность действий при оценке эффективности ГАС сводится к следующему: анализу задач, возлагаемых на ГАС условий их применения и определению совокупности исходных данных, выбору критерия (критериев) и показателей эффективности, разработке математической модели функционирования систем, производству расчетов и выработке предложений по составу ГАС и определению оптимальных режимов обслуживания технических средств.

Подобная последовательность действий является обязательной для систем любого уровня иерархии» но объем работы по каждому этапу будет разным. Оценка эффективности начинается с анализа задач, возлагаемых на ГАС, и условий их применения. Особое внимание должно уделяться характеристике гидроакустических районов и акустическим свойствам целей.

Можно заключить, что сущностью рассмотренной методологии оценки эффективности является решение в вероятностном смысле уравнений, связывающих основные тактические характеристики, требования по величине которых положены в основу критерия оценки, и характеристики внешних и внутренних факторов.

Реализация рассмотренной методологии оценки предполагает рассмотрение абсолютных значений характеристик этих факторов и их флюктуаций в различных условиях, объединив их в группы: акустические характеристики объекта наблюдения; влияние морской среды на распространение акустической энергии; помехи приему гидроакустических сигналов; техническое состояние гидроакустических средств.

Литература

1. А.с. №2016616822 РФ Расчет лучевой картины: / А.М. Василенко, В.А. Пятакович, О.А. Алексеев. Оубл.26.04.16.
2. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Перспективные методы решения научной проблемы классификации целей нейросетевой экспертной системой при мониторинге морской обстановки // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 139–148.
3. Пятакович В.А., Рычкова В.Ф. Параметрическая оптимизация нейросетевой системы классификации морских целей по критерию надежности // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 153–162.
4. Исакович М.А. Общая акустика: монография – М.: Наука, 1973. – 495 с.
5. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. – 584 с.
6. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Чудаков М.В., Пятакович В.А., Просветная радиогидроакустическая система мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры в морской среде. Датчики и системы – М.: 2016. – № 8-9 (206). – С. 9-13.
7. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Чудаков М.В., Пятакович В.А., Дальний параметрический прием электромагнитных волн, формируемых техническими источниками в морской среде. Датчики и системы – М.: 2016. – № 8-9 (206). – С. 14-18.
8. Мироненко М.В., Пятакович В.А., Василенко А.М., Результаты экспериментальных исследований способа определения профиля морского объекта и реализующей его системы. Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 2(31) – С. 64-69.

9. МIRONENKO M.B., VASILENKO A.M., PYATAKOVICH V.A. Обнаружение и распознавание источников гидрофизических и геофизических полей, измеряемых в морской среде // Мониторинг. Наука и технологии. – 2017. – № 1(30) – С. 16-19.
10. МIRONENKO M.B., MALASHENKO A.E., VASILENKO A.M., PYATAKOVICH V.A. Реализация в системе мониторинга операций распознавания и классификации морских целей // Датчики и системы – М.: 2019. – № 1(232). – С. 14–17.
11. МIRONENKO M.B., MINAEV D.D., VASILENKO A.M., PYATAKOVICH V.A. Дистанционная гидроакустическая размеромерия подводных объектов // Датчики и системы – М.: 2017. – № 10 (218). – С. 41–47.
12. PYATAKOVICH V.A., VASILENKO A.M., FILIPPOVA A.V. Технология создания автоматизированной системы дальнего приема и нейросетевой классификации гидрофизических полей морских акватории // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 247-258.
13. PYATAKOVICH V.A., VASILENKO A.M., MIRONENKO M.B. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. – 190 с. ISBN 978-5-7444-3790-9.
14. PYATAKOVICH V.A., VASILENKO A.M., HOTINSKIY O.V. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография – Владивосток: Мор. гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2017. – 255 с. ISBN 978-5-8343-1066-2.
15. PYATAKOVICH V.A. Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 169–176.
16. Теория игр и статистических решений: пер. с англ. / Д. Блекуэлл, М. А. Гиршик; Под ред. Б. А. Севастьянова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 374 с.
17. УРИК Р.Д. Основы гидроакустики : монография – Л. : Судостроение, 1978. 448 с.
18. PYATAKOVICH V.A., FILIPPOV E.G. Нейросетевая система в задаче управления распознаванием сложного технического объекта в морской среде // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 239-246.
19. PYATAKOVICH V.A., VASILENKO A.M., MIRONENKO M.B. Обучение нейронной сети как этап разработки экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. № 3(32). С. 138-149. DOI.org/10.5281/zenodo.897021.
20. Патент № 2681242 РФ Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей: / Пятакович В.А. Оpubл. 05.03.19.

References

1. A.s. №2016616822 RF Raschet luchevoy kartiny [The calculation of the radiation pattern]. : / A.M. Vasilenko, V.A. Pyatakovich, O.A. Alekseev. Opubl.26.04.16..
2. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Perspektivnye metody resheniya nauchnoy problemy klassifikatsii tseley neyrosetevoy ekspertnoy sistemoy pri monitoringe morskoy obstanovki . [Perspective methods for solving the scientific problem of target classification performed by a neural network expert system when monitoring a maritime environmed]. // Morskije intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 139–148.
3. Pyatakovich V.A., Rychkova V.F. Parametricheskaya optimizatsiya neyrosetevoy sistemy klassifikatsii morskikh tseley po kriteriyu nadezhnosti [Parametric optimization of the marine target neural network classification system by reliability criterion]. // Morskije intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 153–162.
4. Isakovich M.A. Obshchaya akustika [General acoustics]. : monografiya – M. : Nauka, 1973. – 495 s.
5. Kley K., Medvin G. Akusticheskaya okeanografiya [Acoustic oceanography]. . M.: Mir, 1980. – 584 s.
6. Malashenko A.E., Mironenko M.V., Chudakov M.V., Pyatakovich V.A., Prosvetnaya radiogidroakusticheskaya sistema monitoringa poley atmosfery, okeana i zemnoy kory v morskoy srede [Luminal radiohydroacoustic system for monitoring of fields of the atmosphere, ocean and earth's crust in the marine environment]. . Datchiki i sistemy – M.: 2016. – № 8-9 (206). – S. 9-13.
7. Malashenko A.E., Mironenko M.V., Chudakov M.V., Pyatakovich V.A., Dal'niy parametricheskii priem elektromagnitnykh voln, formiruemykh tekhnicheskimi istochnikami v morskoy srede [Distant parametric electromagnetic-waves receiving technical sources formed in the marine environments]. . Datchiki i sistemy – M.: 2016. – № 8-9 (206). – S. 14-18.
8. Mironenko M.V., Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy sposoba opredeleniya profilya morskogo ob"ekta i realizuyushchey ego sistemy [Experimental research results to develop a method for sea objects profiling and a system to implement it]. . Monitoring. Nauka i tekhnologii. – 2017. – № 2(31) – S. 64-69.
9. Mironenko M.V., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Obnaruzhenie i raspoznavanie istochnikov gidrofizicheskikh i geofizicheskikh poley, izmeryaemykh v morskoy srede [Detection and recognition of sources of hydrophysical and geophysical fields measured in the sea meadium]. // Monitoring. Nauka i tekhnologii. – 2017. – № 1(30) – S. 16-19.
10. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Realizatsiya v sisteme monitoringa operatsiy raspoznavaniya i klassifikatsii morskikh tseley [Implementing recognition and classification of sea targets in a monitoring system]. // Datchiki i sistemy – M.: 2019. – № 1(232). – S. 14–17.
11. Mironenko M.V., Minaev D.D., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Distsionnaya gidroakusticheskaya razmerometriya podvodnykh ob"ektov [Remote hydroacoustic dimension measurement of objects]. // Datchiki i sistemy – M.: 2017. – № 10 (218). – S. 41–47.

12. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Filippova A.V. Tekhnologiya sozdaniya avtomatizirovannoy sistemy dal'nego priema i neyrosetevoy klassifikatsii gidrofizicheskikh poley morskikh akvatorii [Method for developing and an automated system for long-range parametric and neural network classification of hydro-physical fields of sea water areas]. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 7. Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – S. 247-258.
13. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Tekhnologii nelineynoy prosvetnoy gidroakustiki i neyrochetkikh operatsiy v zadachakh raspoznavaniya morskikh ob"ektov [Technologies of non-linear translucent hydroacoustics and neuro-fuzzy operations in problems of recognition of marine objects]. : monografiya. – Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2016. – 190 s. ISBN 978-5-7444-3790-9.
14. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Khotinskiy O.V. Raspoznavanie i klassifikatsiya istochnikov formirovaniya poley razlichnoy fizicheskoy prirody v morskoy srede [Recognition and classification of sources for formation of fields various physical nature in marine environment]. : monografiya – Vladivostok: Mor. gos. un-t im. G. I. Nevel'skogo, 2017. – 255 s. ISBN 978-5-8343-1066-2.
15. Pyatakovich V.A. Sistema klassifikatsii morskikh tseley na baze neyrosetevykh tekhnologiy [Marine target classification system based on neural network technologies]. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 169–176.
16. Teoriya igr i statisticheskikh resheniy: per. s angl. [Game theory and statistical solutions]. / D. Blekuell, M. A. Girshik; Pod red. B. A. Sevast'yanova. – M : Izd-vo inostr. lit., 1958. 374 s.
17. Urik R.D. Osnovy gidroakustiki [Basics of hydroacoustics]. : monografiya – L. : Sudostroenie, 1978. 448 s.
18. Pyatakovich V.A., Filippov E.G. Neyrosetevaya sistema v zadache upravleniya raspoznavaniem slozhnogo tekhnicheskogo ob"ekta v morskoy srede [Neural network system in the task of controlling the recognition of a complex technical object in the marine environment]. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 7. Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – S. 239-246.
19. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Obuchenie neyronnoy seti kak etap razrabotki ekspertnoy sistemy dlya klassifikatsii istochnikov fizicheskikh poley pri monitoringe akvatorii [Neural network training as a stage in the expert system development to classify the sources of physical fields when monitoring water areas]. // Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. – Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2017. № 3(32). S. 138-149. DOI.org/10.5281/zenodo.897021.
20. Patent № 2681242 RF Intellektual'naya sistema obnaruzheniya i klassifikatsii morskikh tseley [Intelligent system for detecting and classifying of marine targets]. : / Pyatakovich V.A. Opubl. 05.03.19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Пятакович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia. e-mail: pva.877com@mail.ru

Виктория Феликсовна Рычкова, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia. e-mail: rychkova@msun.ru

Алина Валерьевна Филиппова, конструктор–технолог АО «Союз-Ремонт», 690922, Россия, Приморский край, о. Русский. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

Alina V. Filippova, Constructor–technologist Joint-Stock Company «Souz-Remont». 690922, Vladivostok, Russia. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

Наталья Владиславовна Пятакович, младший научный сотрудник отдела организации научной работы Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, . 90062, г. Владивосток, Камский переулок, 6. e-mail: pva.natali@yandex.ru

Natalia V. Pyatakovich, Junior Researcher, Department of Organization of Scientific Work Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia. e-mail: pva.natali@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.027

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

Оптимальные и адаптивные методы классификации гидроакустических сигналов для морских интеллектуальных систем

В.А. Пятакович¹, А.Б. Сузов², В.Ф. Рычкова³,¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской научный комитет ВМФ, ³ Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,

Аннотация. В статье рассмотрены обстоятельства, обусловившие необходимость разработки принципиально новых методов и средств, основанных на подсветке среды сигналами низкой звуковой частоты, обеспечивающих обнаружение акустически слабозаметных объектов, на дальних дистанциях, которые согласно результатам их испытаний, могут быть использованы при обнаружении малошумных объектов перспективными морскими интеллектуальными системами распознавания и классификации. Рассмотрена задача целенаправленной предобработки обучающей выборки для ускорения обучения нейронной сети. Рассмотрен метод извлечения обучающих выборок, который обеспечивает сохранение в сформированной подвыборке важнейших топологических свойств исходной выборки, не требуя при этом загрузки в память электронно-вычислительной машины исходной выборки, а также многочисленных проходов исходной выборки, что позволяет сократить объём выборки и уменьшить требования к ресурсам электронно-вычислительных машин.

Ключевые слова: классификация морских объектов, просветная система мониторинга, обработка сигналов, эхо-сигналы объектов, метод активной корреляции, обучающая выборка, качество обучающей выборки, распознавание образов

Optimal and adaptive methods to classify hydroacoustics signals in marine intelligent systems

Valeriy A. Pyatakovich¹, Andrew B. Surov², Victoria F. Rychkova³¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²Chairman of the Naval Scientific Committee, ³Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi,

Abstract. The article discusses the circumstances that necessitated the development of the fundamentally new methods and tools for the long-range detection of acoustically low-observable objects. According to the results of their tests, those methods and tools can come in handy when detecting low-noise objects by means of advanced marine intelligent recognition and classification systems. The problem of optimal data preprocessing for faster neural network training is explored. Considered a method of training samples is offered. It maintains saving the important topological properties of the original sample in a formed sub-sample, and does not require download of the original sample to the computer memory, and the numerous passages of the original sample. This reduces the size of the sample and reduces the resource requirements of a computer.

Key words: classification of sea objects, low-frequency monitoring system, signal processing, echo-signals of objects, active correlation method, training set, training set quality, pattern recognition, diagnostics

Введение

Теория и практика обнаружения целей методами активной и пассивной гидролокации достаточно полно разработаны и освещены в многочисленных работах [2–4, 9]. В настоящее время решение задачи гидролокационного наблюдения и измерения характеристик сигналов реальных объектов усложнилось из-за снижения их шумовых и отражающих характеристик.

Эти обстоятельства обусловили необходимость разработки новых методов и средств, обеспечивающих обнаружение на дальних дистанциях акустически слабозаметных объектов и их классификацию.

Характерные особенности гидроакустических методов обнаружения

Сущность метода эхолокации целей заключается в следующей последовательности операций: формировании мощных импульсных сигналов, направленном излучении и приеме сигналов, выделении в принимаемых сигналах эха от цели, последующей обработке и анализе выделенных на фоне помех эхо-сигналов, принятии решения об

обнаружении цели по наличию превышения в заданном направлении эхо-сигналом порогового уровня.

При наблюдении морских объектов средствами активной гидролокации необходимо применять высокочастотное облучение объектов, чтобы обеспечить получение устойчивых эхо-сигналов от целей и их последующее надежное выделение на фоне помех различного происхождения. К недостаткам метода эхолокации целей относятся:

- высокая степень затухания сигналов, обусловленная необходимостью применения высокочастотного излучения;

- интенсивное многолучевое распространение сигналов в мелководье прибрежных и проливных зон, повышенный уровень шумов приливно-отливных и регулярных морских течений усложняют процесс выделения эхо-сигналов и регистрации объектов;

- существенные ограничения на возможности выделения эхо-сигналов накладывает реверберационная помеха;

- интенсивность отраженных от цели эхо-сигналов существенно зависит от частоты излученного сигнала и размера цели, отражающих

свойств и конфигурации корпуса, а также пеленга на цель.

Метод позволяет сделать лишь приближенную оценку принадлежности обнаруженного объекта к широкому классу целей по интенсивности и длительности эхо-сигнала.

Стремление получить большие дальности наблюдения объектов за счет увеличения мощности зондирующих сигналов привели к неоправданным, с точки зрения достигнутого эффекта, конструктивным усложнениям гидроакустических комплексов, и к возрастанию экономических затрат, а также времени на их разработку и внедрение.

Сущность метода шумопеленгования целей заключается в приеме сигналов, излучаемых целью, спектральном анализе принимаемых сигналов, измерении характеристик спектров и выделении участков частотного диапазона, в которых преобладает акустический сигнал от пеленгуемого источника, измерении уровня и частоты дискретных составляющих и их последующей идентификации. Цель обнаруживается и классифицируется по совпадению характеристик измеряемых спектров и их дискретных составляющих с аналогичными величинами, принадлежащими известным классам объектов.

Основной причиной ограниченных возможностей метода шумопеленгования является уменьшение дальности обнаружения целей, обусловленное тенденцией снижения шумового поля подводных целей за счет улучшения технических характеристик движителей различного типа, механизмов и корпусных конструкций, определяющих наличие дискретных составляющих в спектрах сигналов шумоизлучения [9, 10].

Перечисленные обстоятельства обусловили необходимость разработки принципиально новых методов и средств, обеспечивающих обнаружение акустически слаботемных объектов на дальних дистанциях. К таким разработкам относятся способы обнаружения целей, основанные на подсветке среды низкочастотными сигналами и закономерностях нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования структуры сигналов накачки морской среды излучениями и полями движущихся объектов [3, 4].

Закономерности нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования сигналов повышают информативность принимаемых сигналов и надежность обнаружения целей.

Суть способов обнаружения морских целей, основанных на подсветке среды сигналами низкой звуковой частоты

Приведем перечень способов обнаружения целей, которые согласно результатам их испытаний, могут быть использованы при обнаружении малозумных объектов [5, 9].

1. Способ основан на подсветке среды акустическими сигналами низкой звуковой частоты и обнаружении цели по закономерностям дифракции сигналов подсветки на корпусе цели, а также искажениями характеристик среды акустическими и гидродинамическими свойствами кильватерного следа при движении цели. Известен как теневой метод обнаружения.

2. Способ основан на усилении интенсивности параметрического преобразования низкочастотных сигналов подсветки близкой частоты и формировании сигналов разностной частоты в нелинейной области морской среды, создаваемой при движении объекта. Известен как способ обнаружения цели на прозвучиваемом водном рубеже, развитием которого является способ формирования направленного пространственного излучения инфразвуковых сигналов разностной частоты, позволяющий использовать кильватерный след цели как протяженную параметрическую антенну бегущей волны.

3. Способ нелинейного преобразования сигнала подсветки, основанный на искажении фронта гармонической волны сигнала подсветки целью и формировании в искаженном сигнале дополнительных гармоник.

4. Способ основан на выделении СНЧ колебаний цели, как целого, при движении в среде, а также пространственной модуляции сигналов подсветки колебаниями морской среды, вовлеченной в движение цели. Используются инфранизкочастотные модуляционные составляющие огибающей сигналов подсветки среды, обусловленные пересечением цели гидроакустической барьерной линии и последовательным экранированием разнополярных зон Френеля.

5. Способ основан на закономерностях параметрического преобразования низкочастотных сигналов подсветки морской среды инфранизкочастотными составляющими шумоизлучения цели.

Движущийся акустически слаботемный морской объект может быть зарегистрирован по признакам пространственной амплитудно-фазовой модуляции и параметрического преобразования характеристик установившегося просветного поля излучениями и полями, сопутствующими движению цели в морской среде. Достаточно исследованы следующие закономерности, возникающие за счет искажения и модуляции сигналов подсветки среды движущимся подводным объектом и сопутствующими его движению полями:

- рассеяние и дифракция низкочастотных акустических сигналов подсветки среды на корпусе;
- рассеяние и затухание низкочастотных сигналов подсветки турбулентным гидродинамическим кильватерным следом цели, а также сопутствующей движению объекта возмущенной областью среды;
- параметрическое преобразование низкочастотных сигналов подсветки близкой частоты в среде и усиление такого преобразования в области среды, возмущенной движущимся объектом, прежде всего в случае применения сложных полигармонических сигналов;
- амплитудная и фазовая модуляция низкочастотных сигналов подсветки характерными дискретными составляющими инфранизкочастотного шумоизлучения объекта при их совместном распространении в нелинейной среде;
- инфранизкочастотная и сверхнизкочастотная модуляция низкочастотных сигналов подсветки колебаниями корпуса движущегося объекта (как целого), а также регулярными гидродинамическими

колебаниями водных масс, вовлеченных в его движение;

– модуляция и параметрическое преобразование просветных сигналов электрическим и электромагнитным полями, формируемыми объектом.

Дальнее обнаружение и контроль пространственно-временных характеристик полей морских объектов на протяженных акваториях основан на выполнении следующих операций. Низкочастотной (десятки–сотни герц) подсветке контролируемой среды, нелинейном взаимодействии и параметрическом преобразовании просветных волн волнами объекта различной физической природы (акустическими, электромагнитными и гидродинамическими), приеме преобразованных просветных волн; узкополосном спектральном анализе и выделении признаков преобразования сигналов объектом.

Последовательность перечисленных операций обеспечивает возможность дальнего обнаружения и классификации акустически слабозаметных, в том числе и с малыми волновыми параметрами объектов.

Область применимости и адекватность методов классификации морских объектов

Анализ использования возможных методов классификации морских объектов и особенностей основной решаемой задачи, а именно создание системы мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием нейросетевых технологий позволил выделить два типа нейросетей, наиболее перспективных для решения поставленной задачи: многослойный перцептрон (обучается методом обратного распространения ошибки) и сеть встречного распространения ошибки.

Сейчас искусственные нейронные сети являются лишь упрощенным подобием естественных (биологических) нейронных сетей. Нервные системы человека и животных гораздо сложнее тех устройств, которые можно создать с помощью современных технологий. Однако для успешного решения многих практических задач оказалось достаточным «приблизительно» понять общие нормы функционирования нервной системы.

Некоторые виды нейронных сетей представляют собой математические модели, имеющие всего лишь отдаленное сходство с нейрофизиологией, что отнюдь не препятствует их практическому применению. Такие характеристики нейросетевых методов, как возможность нелинейного моделирования и сравнительная простота реализации, часто делают их незаменимыми при решении сложнейших многомерных задач [8].

Нейронные сети нелинейны по своей природе и представляют исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных (термин, используемый в отношении ряда свойств многомерных пространств и комбинаторных задач. Впервые термин ввел Ричард Эрнст Беллман применительно к общей задаче

динамического программирования [1]. Выражение употребляется в работах по технической кибернетике, машинному обучению и анализу сложных систем, в том числе в заголовках).

Обучение – это итерационная процедура, требующая длительных вычислений. На каждой итерации происходит уменьшение функции ошибки. Если выбраны множество обучающих примеров – пар (X_m, Y_m) ($m=1, 2, \dots, M$) – и способ вычисления функции ошибки D , обучение нейронной сети превращается в задачу многомерной оптимизации. Функция D может иметь произвольный вид. Поэтому обучение в общем случае – многоэкстремальная невыпуклая задача оптимизации.

Для решения этой задачи могут быть использованы алгоритмы: локальной оптимизации с вычислением частных производных первого порядка, локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка, стохастические алгоритмы оптимизации и алгоритмы глобальной оптимизации.

К первой группе относятся: градиентный алгоритм (метод скорейшего спуска), методы с одномерной и двумерной оптимизацией целевой функции в направлении антиградиента, метод сопряженных градиентов, методы, учитывающие направление антиградиента на нескольких шагах алгоритма.

Ко второй группе относятся: метод Ньютона, методы оптимизации с разреженными матрицами Гессе, квазиньютоновские методы, метод Гаусса–Ньютона и Левенберга–Марквардта (алгоритм Левенберга–Марквардта – метод оптимизации, направленный на решение задач о наименьших квадратах, альтернатива методу Ньютона, может рассматриваться как комбинация последнего с методом градиентного спуска, или как метод доверительных интервалов; алгоритм был сформулирован независимо Левенбергом в 1944 г. и Марквардтом – в 1963 г.).

Стохастическими алгоритмами являются поиск в случайном направлении, имитация отжига, метод Монте-Карло (численный метод статистических испытаний). Задачи глобальной оптимизации решаются с помощью перебора значений переменных, от которых зависит целевая функция. Для сравнения методов обучения нейронных сетей необходимо использовать в качестве критериев количество шагов алгоритма, необходимых для получения решения и количества дополнительных переменных, которые потребуются для организации вычислительного процесса.

Обобщая сказанное, процесс обучения нейронной сети состоит в поиске целевой функции $g(E)$, оптимальной по E , где E – синаптическая матрица сети. Обычно это итерационная процедура, весьма сложная и длительная при ее прямом использовании.

Существуют три парадигмы обучения: с учителем, самообучение и смешанная. В первом случае при обучении используют набор правильных ответов на каждый входной набор и по ним настраивают весовые коэффициенты. При обучении без учителя не требуются знания правильных ответов на каждый обучающий пример. В этом случае раскрывается внутренняя структура данных или корреляция между образцами в системе данных, что позволяет распределить данные по категориям.

При смешанном обучении часть весов определяется посредством обучения с учителем, а другая часть получается с помощью самообучения.

Здесь необходимо коротко раскрыть определения фундаментальных проблем обучения: емкости, сложности образов и вычислительной сложности. Емкость – это понятие, связанное с количеством образов, которые может запомнить сеть, и возможностями сети после обучения.

Сложность образцов определяет число обучающих примеров, необходимых для достижения способности сети к общению. Понятие «вычислительная сложность» подразумевает функцию зависимости объема работы, которая выполняется некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Для управляемого обучения сети необходимо подготовить набор обучающих данных.

Эти данные представляют собой примеры входных данных (признаков) и соответствующих им выходов (классов). С помощью того или иного алгоритма сеть учится устанавливать связь между первыми и вторыми [6, 7, 10].

Наиболее распространены следующие фундаментальные правила обучения: коррекция по ошибке, алгоритм (машина) Больцмана, набор правил Хебба, обучение методом соревнования (конкуренции), генетический алгоритм. Следует отметить, что во многих практических задачах адаптировать известный алгоритм – не менее сложная задача, чем создать собственный (только под решаемую задачу).

Понятие класса морского объекта (МО) связано с числом характеризующих его классификационных признаков N , описываемых рядом аппаратно измеренных или расчетных параметров. Каждому классу морского объекта соответствует N – мерный случайный вектор признаков X . Вектор признаков описывается строкой фактически полученных значений параметров по одному морскому объекту к моменту принятия решения о ее классе. По терминологии искусственных нейронных сетей такая строка называется строкой фактов (наблюдений).

Вопрос о том, сколько таких строк в матрице наблюдений необходимо иметь для обучения нейронной сети, решающей достаточно сложную задачу распознавания морских объектов, непростой. Существуют общие рекомендации относительно оценки размера матрицы данных обучения [9, 10].

Например, выполнение следующего неравенства: $M > W/\varepsilon$, где M – количество данных обучения (строк в матрице), W – число синаптических связей, ε – доля ошибок, допустимая в ходе тестирования. Так, при допустимости 10% ошибок число наблюдений должно быть в 10 раз больше числа имеющихся в сети весовых коэффициентов.

Прежде чем приступить непосредственно к разработке нейронной сети, нужно решить, какие переменные использовать в обучающей выборке. Значения классификационных признаков морского объекта одного класса могут меняться в некоторых пределах, поэтому необходимо знать их статистические свойства. Часть параметров зависят от условий распространения звуковой энергии в морской среде, поэтому при обучении следует учесть изменчивость вертикального распределения скорости звука [2, 3, 9].

Первоначальный выбор исходных переменных (данных обучения) зачастую определяется интуицией эксперта, и возможно включение максимального их числа. На последующих этапах размеры выборки могут корректироваться. Расчеты показывают, что число строк фактов M , описывающих модель поля скорости звука в заданной пространственно-временной области, должно быть от 30 до 50 тысяч даже без учета требований, выдвинутых в работах [3, 10].

Сформировать обучающую выборку можно двумя путями. Первый сопряжен с накоплением данных в натуральных условиях. Даже при получении большого объема информации таким путем выборки будут ограничены временем проведения измерений и пространством района, они имеют локальный характер, и ценность их как представительного статистического материала для обучения нейросети низка.

Если учесть, что обученная нейронная сеть должна обеспечивать принятие решения в пределах некоего интервала глубин расположения шумящего объекта, дистанций и множества вариантов гидрологических условий, связанных с климатической изменчивостью вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), то получение представительной обучающей выборки в натуральных условиях становится не просто дорогостоящей, но и невыполнимой задачей. Каким бы ни был набор наблюдений в реальных условиях, он не в состоянии отобразить того многообразия ситуаций и явлений, которые могут возникнуть.

Кроме того, сбор натуральных данных сопровождается ошибками обсерваций, счисления и гидроакустических измерений, искажениями, отскоками или просто отсутствием данных. От этого не спасают даже современные возможности контроля навигационной обстановки и соблюдение метрологических требований при электроакустических измерениях. Отскоки же, лежащие далеко от области правдоподобных значений некоторой переменной, могут исказить результат обучения. Хотя нейронные сети в целом устойчивы к шумам, у этой устойчивости есть предел.

Свойства, определяемые обучающей выборкой

Для автоматизации сравнительного анализа нейромоделей необходимо разработать набор показателей и методы их расчета, отражающие важнейшие свойства нейромоделей такие как: разнообразие, переобученность, эластичность, эквивалентность, устойчивость к шуму, эмерджентность, а также монотонность выборок, используемых для построения нейромоделей [9, 16].

Монотонность выборки согласно определяется как свойство выборки удовлетворять условию:

$$\forall s, p = 1, 2, \dots, S: x^s \leq x^p \rightarrow y^s < y^p.$$

Определим показатель монотонности i -го выхода по j -му входу для обучающей выборки

$< x, y >$ как:

$$I_{mon}^{i,j} = \frac{1}{S(S-1)} \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^S \{1 | x_j^s \leq x_j^p, y_i^s \leq y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки определим, как:

$$I_{mon} = \frac{1}{N_M N S (S-1)} \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{s=1}^S \{1 | x_j^s \leq x_j^p, y_i^s < y_i^p, s \neq p\}.$$

Показатель монотонности выборки будет равен единице для монотонной выборки, и нулю – для немонотонной выборки.

Очевидно, что чем выше уровень монотонности выборки, тем проще осуществить разделение выборки на классы и тем более простую нейросеть можно выбрать для решения задачи.

Разнообразию является одной из важнейших характеристик систем и определяется числом различных состояний системы. В соответствии с законом «необходимого разнообразия» У. Р. Эшби, создавая систему, способную справиться с решением проблемы, обладающей определенным, известным разнообразием (сложностью), нужно обеспечить, чтобы система имела еще большее разнообразие (знания методов решения), чем разнообразие решаемой проблемы, или была способна создать в себе это разнообразие (владела бы методологией, могла разработать методику, предложить новые методы решения проблемы) [16].

Для генеральной совокупности при неизвестных распределениях признаков условно оценим предельное разнообразие как:

$$I_{div}(X, Y) = \left(\prod_{i=1}^{N_M} \frac{(y_i^{max*} - y_i^{min*})}{\lambda_i^*} \right) \left(\prod_{j=1}^N \frac{(x_j^{max*} - x_j^{min*})}{\lambda_j^*} \right),$$

где λ_j – максимальное количество десятичных разрядов, которое может быть использовано для фиксации значений j -го признака (определяется возможностями измерительной аппаратуры и особенностями задачи);

y_i^{max*}, y_i^{min*} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения i -го выходного признака;

x_j^{max*}, x_j^{min*} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения j -го входного признака.

Для обучающей выборки будем определять абсолютное разнообразие как:

$$I_{div}(x, y) = (N_M + N) \sum_{s=1}^S (1 | \prod_{p=s+1}^S (1 | \sum_{j=1}^N |x_j^s - x_j^p| = 0)),$$

$$x \in X, y \in Y,$$

где $\langle X, Y \rangle$ – генеральная совокупность, из которой извлекается выборка $\langle x, y \rangle$, λ_j – количество десятичных разрядов, используемое для представления значений j -го признака в ЭВМ (на практике определяется типом данных и разрядной сеткой ЭВМ).

Для синтезируемой нейросетевой модели net (для общего случая полностью связанной сети с внешним входом и собственными обратными связями

нейронов) определим показатель предельного разнообразия как:

$$I_{div}(net) = \frac{N N_H^{max} \sum_{i=1}^{N_H^{max}} v_{np}(\varphi(i)) v_{np}(\psi(i))}{round\left(\frac{w^{max} - w^{min}}{\Delta w}\right)},$$

где N_H^{max} – максимально возможное количество нейронов в сети net , $v_{np}(element)$ – характеристика пластичности функционального элемента $element$ нейрона (будем полагать $v_{np}(element)$ равным числу возможных состояний элемента $element$: для дискриминантной функции i -го нейрона $v_{np}(\varphi(i))$ будет равняться числу возможных видов дискриминантных функций, которые могут быть заданы для данного нейрона; для функции активации i -го нейрона $v_{np}(\psi(i))$ будет равняться числу возможных видов функций активации, которые могут быть заданы для данного нейрона, $v_{np}^{max}(\varphi), v_{np}^{max}(\psi)$ – соответственно, максимальные характеристики пластичности дискриминантных и активационных функций среди всех нейронов сети, w^{max}, w^{min} – соответственно, максимальное и минимальное возможные значения весов сети, Δw – минимально возможное изменение веса с учетом разрядности вычислительной сетки ЭВМ, $round$ – функция округления к ближайшему целому числу.

На основе введенных абсолютных показателей предельного разнообразия определим относительные показатели:

Для обучающей выборки определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности:

$$I_{div}(x, X, y, Y) = \frac{I_{div}(x, y)}{I_{div}^*(X, Y)},$$

Для нейронной сети net определим показатель разнообразия по отношению к обучающей выборке:

$$I_{div}(net, \langle x, y \rangle) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}(x, y)}$$

Для нейронной сети net определим показатель разнообразия по отношению к генеральной совокупности:

$$I_{div}(net, X, Y) = \frac{I_{div}(net)}{I_{div}^*(X, Y)}$$

Переобученность распознающей модели net на обучающей выборке x относительно тестовой выборки $x_{тест}, x_{тест} \neq x$, определяют как:

$$\delta_{net}(x, x_{тест}) = v(net, x_{тест}) - v(net, x),$$

$$n(net, x) = \frac{1}{S} \sum_{x=1}^S E(net, x^s),$$

где $n(net, x)$ – частота ошибок модели net на выборке x (в задачах классификации:

$$E(net, x^s) = \{1 | net(x^s) \neq y^s\},$$

в задачах оценивания:

$$E(net, x^s) = \{1 | \delta \leq |net(x^s) - y^s|\},$$

где δ – порог ошибки).

Поскольку нейромодели могут на выходе определять значения не одной, а нескольких переменных, и порог ошибки для экземпляра на практике не всегда может быть задан, а также для большей универсальности и единообразия при решении различных задач определим:

$$E(net, x^s) = 1 - \exp\left(-\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} \left(\frac{\Psi^{(\eta, i)}(x^s) - y_i^s}{\max_{s=1,2,\dots,S} (y_i^s) - \min_{s=1,2,\dots,S} (y_i^s)}\right)^2\right).$$

Эластичность функции $y(x)$ по переменной x_j , определяется как:

$$E_{x_j}(y) = \lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x_j}{x_j}} = \left(\lim_{\Delta x_j \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x_j}\right) \frac{x_j}{y},$$

где $\Delta y = \frac{y(x_j + \Delta x_j) - y(x_j)}{y(x_j)}$, $x_j > 0, y > 0$.

Определим относительную оценку эластичности обучающей выборки $\langle x, y \rangle$ с нормированием для выходной переменной y_i по входной переменной x_j как:

$$E_{x_j, y_i}(\langle x, y \rangle) = \frac{\sum_{s=1}^S \frac{\tilde{x}_j^s}{\tilde{y}_i^s}}{2S} \times \left. \max_{\substack{s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \frac{\max(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p) - \min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)}{\min(\tilde{y}_i^s, \tilde{y}_i^p)} \left| \tilde{x}_j^s - \tilde{x}_j^p \right| > 0 \right\}, \right.$$

где

$$\tilde{x}_j^s = 1 + \frac{x_j^s - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p)},$$

$$\tilde{y}_i^s = 1 + \frac{y_i^s - \min_{p=1,2,\dots,S} (y_i^p)}{\max_{p=1,2,\dots,S} (y_i^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (y_i^p)}.$$

Относительную эластичность по переменной x_j аппроксимирующей функции $y_i = net(x)$, реализуемой нейросетью net на i -ом выходе y_i , обученной на основе обучающей выборки $\langle x, y \rangle$, определим как:

$$E_{x_j}(net, y_i) = \frac{1}{2S} \sum_{s=1}^S \left(\frac{\tilde{x}_j^s \left(\tilde{\Psi}^{(N_M, i)}(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j) - \tilde{\Psi}^{(N_M, i)}(\tilde{x}_j^s) \right)}{\Delta x_j \left(\tilde{\Psi}^{(N_M, i)}(\tilde{x}_j^s) \right)^2} \right),$$

где $\tilde{\Psi}^{(N_M, i)}(\tilde{x}_j^s)$ – расчетное значение на i -ом выходе нейросети net при подаче на ее сети нормированных значений признаков s -го экземпляра; $\tilde{\Psi}^{(N_M, i)}(\tilde{x}_j^s + \Delta x_j)$ –

расчетное значение на i -ом выходе нейросети net при подаче на ее входы нормированных значений признаков s -го экземпляра, а на j -ый вход – скорректированного нормированного на Δx_j значения j -го признака s -го экземпляра [16].

Устойчивость к шуму – свойство нейросетей обеспечивать правильную реакцию на входной сигнал, содержащий шум.

Определим показатель устойчивости обученной нейросети к аддитивному шуму во входном сигнале по j -му входу как:

$$I_{tolj}^l = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left(\left(net(x^s) - net_{(j^+)}(x^s) \right)^2 + \left(net(x_j^s) - net_{(j^-)}(x^s) \right)^2 \right)\right),$$

$${}_{(j^+)}x_g^s = \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) \right), & g = j, \end{cases}$$

$${}_{(j^-)}x_g^s = \begin{cases} x_g^s, & g \neq j, g = 1, 2, \dots, N; \\ x_g^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_g^p) \right), & g = j, \end{cases}$$

$$x_j^- = x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right),$$

где l – заданный уровень шума, $0 < l < 1$.

Показатель устойчивости обученной нейросети к случайному аддитивному шуму во входном сигнале определим как:

$$I_{tol}^l = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{s=1}^S \left(\left(net(x^s) - net_{(+)}(x^s) \right)^2 + \left(net(x_j^s) - net_{(-)}(x^s) \right)^2 \right)\right),$$

$$+_x^s = x_j^s + l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right),$$

$$-_x^s = x_j^s - l \left(\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) \right), j = 1, 2, \dots, N,$$

где l – заданный уровень шума, $0 < l < 1$.

Для автоматизации процесса задания l предлагается использовать выражение:

$$l = \min_{j=1,2,\dots,N} \left\{ \frac{\min_{\substack{s=1,2,\dots,S \\ p=s+1,\dots,S}} \{ |x_j^s - x_j^p| |y^s \neq y^p \}}{\max_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p) - \min_{p=1,2,\dots,S} (x_j^p)} \right\}.$$

Эквифинальность – закономерность функционирования и развития системы, характеризующая ее предельные возможности системы.

Определим относительную эквифинальность нейромодели net как

$$I_{ef}(net, < x, y >) = \frac{NN_w}{N_n^{max}(N_n^{max^2} + N)} \times \exp\left(-\frac{1}{SN} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{N_M} (\psi_{(x^s)}^{(i)} - y_i^s)^2\right),$$

где $\psi_{(x^s)}^{(i)}$ – расчетное значение на i -ом выходе сети при подаче на ее входы экземпляра x^s .

Относительная эквивалентность будет принимать наибольшее значение (в пределе 1) для тех сетей, которые достигли максимально возможных размеров и связности в процессе синтеза структуры, а также наименьшей ошибки (в пределе 0) в процессе обучения.

Эмерджентность (целостность) – закономерность, проявляющаяся в системе в возникновении, появлении у нее новых свойств, отсутствующих у элементов. Свойство целостности связано с целью, для выполнения которой создается система.

Степень целостности системы определяется как

$$I_\alpha = -\frac{C_v}{C_o},$$

где C_o – собственная сложность, представляющая собой суммарную сложность (содержание) элементов системы вне связи их между собой (в случае прагматической информации – суммарную сложность элементов, влияющих на достижение цели); C_v – взаимная сложность, характеризующая степень взаимосвязи элементов в системе (т.е. сложность ее устройства, схемы, структуры).

Применительно к нейросетевой модели определим эмерджентность как

$$I_\alpha = -\frac{\sum_{i=1}^{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} \vartheta_{av}(i, j)}{\sum_{j=1}^{N_n} \vartheta_{ao}(j)},$$

где $\vartheta_{av}(i, j)$ – характеризует наличие связи между i -ым и j -ым нейронами сети ($\vartheta_{av}(i, j) = 1$, если связь имеется; в противном случае – $\vartheta_{av}(i, j) = 0$), $\vartheta_{ao}(j)$ – сложность j -го нейрона, которая может быть определена подобно в единицах элементарных операций сложения и умножения [16]. Необходимо отметить что актуальная задача автоматизации анализа свойств и сравнения нейросетевых моделей решается описанным комплексом моделей критериев, что позволяет автоматизировать решение задачи анализа свойств и сравнения

нейросетевых и нейро-нечетких моделей при решении задач классификации.

Заключение

Обнаружение гидроакустических сигналов и извлечение из них полезной информации определяет основы алгоритмизации обработки данных в интеллектуальных системах классификации морских целей [9]. Процесс формирования и предварительной обработки входных информационных массивов (векторов признаков) предназначен для решения двух задач, первая из которых представляет собой создание библиотеки эталонных образцов, необходимых для обучения распознающей сети, и вторая для распознавания целей [8, 11, 12].

Анализ низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной составляющих амплитудно-частотной характеристики производится отдельно, так как генеральные признаки для различных типов объектов могут находиться в различных частотных диапазонах.

Интеллектуальные системы обеспечивают распознавание и классификацию обнаруженных различными гидроакустическими методами источников сигналов на основе нейросетевых технологий и обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм морских целей. Решение о классификации обнаруженной цели (надводный или подводный объект) принимается обученной нейронной сетью по степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации [10–15].

Распознавание (классификация) морских целей по их амплитудно-частотным характеристикам с помощью вычислительных операций нейронных сетей позволяет ускорить процесс распознавания (классификации) и повысить вероятность идентификации типов как для надводных, так и для подводных целей. Оперативность идентификации морских целей достигается предварительным сжатием информации об объекте, что сокращает время, затрачиваемое на работу и процесс обучения распознающей нейронной сети [12–15]. Отметим, что от сформированной обучающей выборки зависит эффективность процесса обучения, способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этом этапе кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью, поэтому их приходится выбирать на основе компромисса.

Литература

1. Беллман Р., Энджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 205 с.
2. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1970.
3. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. и др. Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды: Монография. – Владивосток: ДВО РАН, 2006. – 173 с.
4. Пятакович В.А., Василенко А.М. Методы расчетной и экспериментальной оценки первичного гидроакустического поля морской цели / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – С. 41–55.
5. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Способ классификации подводных технических объектов экспертной интеллектуальной системой с приемной параметрической антенной / Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 121–126.

6. Пятакович В.А., Василенко А.М., Пашкеев С.В. Комплексный многоуровневый мониторинг морской среды с использованием нейросетевых технологий / Двойные технологии. – М.: 2018. № 3 (84). С. 62–66.
7. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Интеллектуальная система нейросетевой классификации морских целей / Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 115–120.
8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Применение нейросетевых технологий искусственного интеллекта в структуре системы мониторинга и контроля морской среды средствами Военно-Морского Флота / Стратегическая стабильность. – М.: 2018. № 3 (84). С. 53–62.
9. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.
10. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: Монография. – Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2018. – 263 с.
11. А.с. № 2018619739 РФ. Специализированный нейросетевой комплекс классификации зашумленных сигналов морских целей: / В.А. Пятакович, А.М. Василенко, Оpubl. 10.08.2018.
12. А.с. № 2019611559 РФ. Программа проектирования и обучения искусственных нейронных сетей перцептронного типа: / В.А. Пятакович, А.М. Василенко, Оpubl. 29.01.2019.
13. Патент № 2659100 РФ Способ формирования и применения широкомасштабной радиогидроакустической системы мониторинга, распознавания и классификации полей, генерируемых источниками в морской среде: / Василенко А.М., Пятакович В.А., Мироненко М.В. Оpubl. 28.06.2018.
14. Патент № 2681242 РФ Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей: / Пятакович В.А. Оpubl. 05.03.19.
15. Патент № 2681252 РФ Система обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросетевой классификации: / Пятакович В.А., Василенко А.М. Оpubl. 05.03.19.
16. Субботин, С. А. Интегральные показатели качества диагностических нейромоделей / С. А. Субботин // Научная сессия МИФИ – 2010. XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010»: сборник научных трудов. – М.: МИФИ, 2010. – Ч. 1. – С. 12.

References

1. Bellman R., Endzhel E. Dinamicheskoe programmirovaniye i uravneniya v chastnykh proizvodnykh [Dynamic programming and partial differential equations]. M.: Mir, 1974. 205 s.
2. Varakin L.E. Teoriya slozhnykh signalov [Complex signal theory]. Moscow, Sov. radio Publ., 1970.
3. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Taboyakov A.A. i dr. Nizkochastotnyy prosvetnyy metod dal'ney gidrolokatsii gidrofizicheskikh poley morskoy sredy [Scientific and technical developments in translucent hydrolocation monitoring systems of fields of various physical nature]: Monografiya. – Vladivo-stok: DVO RAN, 2006. – 173 s.
4. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Metody raschetnoy i eksperimental'noy otsenki pervichno-go gidroakusticheskogo polya morskoy tseli [Computational and experimental evaluation of a marine sonar target's primary field] / Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo univer-siteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 4. Tula: Izd-vo TulGU, 2018. – S. 41–55.
5. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Sposob klassifikatsii podvodnykh tekhnicheskikh ob"ektov ekspertnoy intellektual'noy sistemoy s priemnoy parametricheskoy an-tennoy [A method to classify underwater technical objects by using expert intelligent system with receiving parametric antenna] / Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Tom 2. S. 121–126.
6. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Pashkeev S.V. Kompleksnyy mnogourovnevnyy monitoring morskoy sredy s ispol'zovaniem neyrosetevykh tekhnologiy [A comprehensive multi-level monitoring of the marine environment using neural network technologies] / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 3 (84). S. 62–66.
7. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Intellektual'naya sistema neyrosetevoy klassifikatsii morskikh tseley [Intelligent system of neural network classification of marine targets] / Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Tom 2. S. 115–120.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Primeneniye neyrosetevykh tekhnologiy is-kusstvennogo intellekta v strukture sistemy monitoringa i kontrolya morskoy sredy sredstvami Voенno-Morskogo Flota [Application of neural network technologies of artificial intelligence in the structure of the system of monitoring and control of the marine environment by means of the Navy] / Strategicheskaya stabil'nost'. – M.: 2018. № 3 (84). S. 53–62.
9. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Raspoznavaniye i klassifikatsiya istochnikov formirovaniya polej razlichnoy fizicheskoy prirody v morskoy srede [Recognition and classification of the sources of the formation of fields of different physical nature in the marine environment]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2017. 255 p.
10. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Neyrosetevye tekhnologii v intellektual'nykh sistemah obnaruzheniya i operativnoy identifikatsii morskikh celey [Neural network technologies in intelligent detection systems and operational identification of marine targets]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2018. 263 p.
11. А.с. № 2018619739 RF. Spetsializirovanny neyrosetevoy kompleks klassifikatsii za-shumlennykh signalov morskikh tseley [Specialized neural network system for classification of noisy signals of sea targets]: / V.A. Pyatakovich, A.M. Vasilenko, Opubl. 10.08.2018.
12. А.с. № 2019611559 RF. Programma proektirovaniya i obucheniya iskusstvennykh neyronnykh setey perseptronnogo tipa [Program for designing and training artificial neural networks of perceptron type]: / V.A. Pyatakovich, A.M. Vasilenko, Opubl. 29.01.2019.
13. Patent № 2659100 RF Sposob formirovaniya i primeneniya shirokomasshtabnoy radiogid-roakusticheskoy sistemy monitoringa, raspoznavaniya i klassifikatsii poley, generirue-mykh istochnikami v morskoy srede [large-scale radio-

- hydro acoustic system formation and application method for monitoring, recognizing and classifying the fields generated by sources in the marine environment]: / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Mironenko M.V. Opubl. 28.06.2018.
14. Patent № 2681242 RF Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей [Intelligent system for detecting and classifying of marine targets]: / Pyatakovich V.A. Opubl. 05.03.19.
15. Patent № 2681252 RF Система обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросете-вой классификации [Hydro acoustic signals detecting and their neural network classification system]: / Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Opubl. 05.03.19.
16. Subbotin, S. A. Integral'nye pokazateli kachestva diagnosticheskikh neyromodeley [Integral quality indicators of diagnostic neuromodels] / S. A. Subbotin // Nauchnaya sessiya MIFI – 2010. Khil Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konfe-rentsiya «Neyroinformatika-2010»: sbornik nauchnykh trudov. – M.: MIFI, 2010. – Ch. 1. – S. 12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Пятакович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062, Russia. e-mail: pva.877com@mail.ru

Андрей Борисович Суров, доктор технических наук, старший научный сотрудник, председатель Морского научного комитета. 191055 г. Санкт-Петербург, Адмиралтейский проезд, д. 1. e-mail: sureech@mail.ru

Andrew Borisovich Surov, Dr. Sci. (Eng). Chief research scientist, Chairman of the Naval Scientific Committee. Admiralteyskiy proezd, 1, Saint Petersburg, Russia. e-mail: sureech@mail.ru

Виктория Феликсовна Рычкова, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности. Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities. Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st. 690059. Vladivostok, Russia. e-mail: rychkova@msun.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.029

УДК 623.98: 534.222: 004.93:1

Адаптивная локально-оптимальная стратегия управления эксплуатацией нейросетевой системы классификации морских целей

В.А. Пятакович¹, А.П. Пурденко¹, В.Ф. Рычкова², Е.Г. Филиппов³¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, ²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ³Дальневосточный федеральный университет

Анотация. В работе рассмотрены задачи определения последовательности, характера и величины управляющих воздействий на состояние морского технического объекта и расчета надежности его аппаратуры, используемой в общей структуре нейросетевой экспертной системы классификации морских целей (морская система мониторинга с элементами искусственного интеллекта) при мониторинге морских акваторий. Определены локально и глобально оптимальные стратегии гарантированного управления эксплуатацией интеллектуальной автономной системы классификации морских целей. Предложена общая методика гарантированного управления эксплуатацией элементной базы аппаратуры интеллектуальной автономной системы классификации морских целей. Общая методика расчета наиболее целесообразных вариантов стратегий управления объектом, выработана на основе решения частных задач, исходя из реальных возможностей управления эксплуатацией и информационного обеспечения. Представленный в работе набор алгоритмов позволяет находить математическую модель прогнозируемого процесса по критерию гарантированного времени безотказного функционирования в ситуациях, когда неизвестны стохастические характеристики возмущающих факторов. Особенность исследуемых нами задач состоит в том, что они решаются в условиях неполной и не всегда достоверной информации.

Ключевые слова: нейросетевая экспертная система, величина управляющих воздействий на объект, стратегия гарантированного управления эксплуатацией объекта, прогноз технического состояния, морская интеллектуальная автономная система классификации.

The adaptive locally optimal strategy for managing the operation of the neural network system of classification of sea targets

Valeriy A. Pyatakovich¹, Alexander P. Purdenko¹, Victoria F. Rychkova², Evgenii G. Filippov³¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, ²Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, ³Far Eastern Federal University

Abstract. The paper deals with the problems of determining the sequence, nature and magnitude of control actions influencing the state of the marine technical object as well as with the problems of calculating the reliability of its equipment used in the generic structure of the neural network expert system of classification of sea targets (marine monitoring system with elements of artificial intelligence) while monitoring sea waters. The locally and globally optimal strategies of guaranteed operation management of the intelligent autonomous system of classification of sea targets are determined. The general technique of guaranteed control over the operation of the hardware components constituting the equipment of the intelligent autonomous system for classification of sea targets is offered. The general procedure for calculating the most appropriate strategies for the object management has been developed through solving specific problems, based on the real possibilities of operation management and information systems. The set of algorithms presented in this paper can be used to calculate the mathematical model of the predicted process by considering the guaranteed time of trouble-free operation in situations where the stochastic characteristics of the disturbing factors are unknown. A distinguishing feature of the problems we study lies in the fact that they should be solved in conditions of the incomplete and not always reliable information.

Key words: neural network expert system, the volume of the control actions applied to the object, the strategy for the guaranteed object management, the forecast of technical condition, marine intelligent autonomous classification system.

Введение

Основная целевая функция автономной системы управления – выживание объекта управления. Если управляющая система (УС) автономна, то из этого следует первая из целей, которых УС добивается при управлении (обычно такие цели называют «целевыми функциями»). Эта цель состоит в том, чтобы сохранить свой объект управления (ОУ), свое тело хотя бы уже потому, что управляющая система может быть воплощена, реализована только на некоторых материальных элементах, и этими элементами являются элементы и подсистемы тела ОУ. Так, биологическая нервная система реализована на нейронах, соединенных в нервные ткани – нервные сети [9, 13].

Эффективность функционирования и работоспособность технических объектов в

значительной степени зависят от параметров их элементов. Отклонения реальных значений параметров от расчетных, возникающие в процессе производства, хранения и эксплуатации, приводят обычно к ухудшению качества функционирования или отказам технических объектов и заставляют предпринимать специальные меры по обеспечению поддержания необходимых характеристик объекта в условиях неизбежных вариаций его параметров [1, 6, 9, 15].

Задача поиска оптимальной (в минимаксном смысле) стратегии управления составляет содержание основного этапа гарантированного управления эксплуатацией и связана с определением последовательности, характера и величины управляющих воздействий на состояние морского технического объекта (МТО), в данном

случае – системы морского мониторинга с элементами искусственного интеллекта (СММ), а в частности на ее элементную базу [5–14].

При этом в зависимости от информативности обеспечения, избранного критерия оптимальности, возможности управления, условий эксплуатации и т.п. в рамках общей постановки рассматриваемой задачи можно выделить ряд частных ее разновидностей. Так, при использовании разных критериев оптимальности возникают задачи формирования тех или иных стратегий гарантированного управления эксплуатацией программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) СММ.

В частности, применение критерия гарантированного времени безотказной работы обуславливает задачи поиска $u(\tau, y^*)$, обеспечивающей: максимум гарантированного времени безотказной работы СММ при заданных ограничениях на ресурсы и возможности управления; заданное гарантированное время безотказной работы при минимальном расходе ресурса элементной базы СММ [1, 2 и 3].

В зависимости от возможностей управления эксплуатацией и наличия информации о закономерностях дрейфа параметров объекта и имеющихся ресурсах (в том числе и вычислительных), среди разновидностей общей задачи формирования $u(\tau, y^*)$ можно выделить: задачи поиска глобально оптимальных стратегий гарантированного управления эксплуатацией; задачи определения локально-оптимальных стратегий $u(\tau, y^*)$; задачи построения вырожденных стратегий гарантированного управления эксплуатацией.

Естественно, что приведенный выше список не исчерпывает всего многообразия разновидностей задач определения стратегий гарантированного управления эксплуатацией ПЛИС СММ, но отражают основные особенности других таких задач и являются наиболее типичными для практики.

С учетом особенностей минимаксного подхода (отсутствие общих рецептов решения) формальное описание представленных задач целесообразно осуществлять применительно к конкретным условиям. Вообще говоря, выбор стратегии проведения управляющих воздействий является наиболее важной частью любых задач управления, в том числе и задач гарантированного управления эксплуатацией, поскольку правильный выбор здесь определяет, в конечном счете, достижение (или не достижение) цели управления. Правильность выбора $u(\tau, y^*)$ не только гарантирует безотказность и сохранение заданного качества эксплуатации СММ, но и существенно увеличивает его эксплуатационный ресурс. При отсутствии управления эксплуатацией любая, даже самая надежная по своей схеме и конструкции система, может стать ненадежной.

Наряду со сложностью и трудоемкостью формирования оптимальной минимаксной стратегии $u(\tau, y^*)$, нельзя оставить без внимания и трудности, связанные с реализацией такой стратегии на практике. В организационном отношении $u(\tau, y^*)$ является чрезвычайно неудобной. Гораздо более удобной в реализации является стратегия управления, при которой управляющее воздействие

осуществляется через заранее известные промежутки времени. При этом заранее известны также должны быть характер и величина таких воздействий. Такая стратегия носит название директивной и получила широкое распространение на практике.

Основой для назначения момента времени директивного управления эксплуатацией служат данные об интенсивностях отказов составляющих частей или объектов в целом. В качестве математического аппарата используется теория массового обслуживания и теория восстановления. При этом, естественно, игнорируются причины и физические предпосылки утраты СММ работоспособности. В итоге директивная стратегия управления обеспечивает заданное качество функционирования лишь относительно заранее определенных для некоторой совокупности объектов характеристик потока отказов.

Для каждого отдельного объекта из данной совокупности результат директивного управления появляется как случайное событие [1, 4], роль управления эксплуатацией как средства предотвращения отказов используется далеко не полностью. При этом оказывается невозможным гарантировать безотказность функционирования ПЛИС СММ. Вместе с тем, вопросы назначения директивных стратегий управления эксплуатацией изучены достаточно хорошо. В настоящее время разработано немало методик и практических рекомендаций по указанной тематике [1, 15].

К сожалению, использование результатов таких работ для гарантированного управления эксплуатацией редко бывает возможным. Отсюда вытекает необходимость разработки помимо алгоритмов формирования $u(\tau, y^*)$ новых методик реализации избранной стратегии. Общая формулировка задач гарантированного управления эксплуатацией еще не позволяет получить их общее решение. Можно только сказать, что они относятся к классу оптимизационных задач, и их решение, как правило, следует искать на основе методов вычислительной математики и численного эксперимента.

Алгоритмы прогноза гарантированного управления эксплуатацией СММ

Технический объект ответственного назначения (система морского мониторинга с элементами искусственного интеллекта) – это технический объект, обеспечивающий безопасное производство или выполняющий особо важные функции в обороне, экосфере и др., отказ которого на заданном интервале эксплуатации времени недопустим [1, 6, 9, 15]. Трудности, связанные с нахождением оптимальной минимаксной стратегии гарантированного управления эксплуатацией, часто вынуждают прибегать к определенным упрощениям и вводить аппроксимацию $u^{opt}(\tau, y^*)$. Такой подход является традиционным в теории оптимального управления и часто применяется на практике из-за большей простоты достижения конкретных результатов. Особенно велико значение этого перехода в условиях априорной неопределенности, когда уместно пойти на некоторые упрощения, без которых найти решение задачи чрезвычайно сложно, либо вообще невозможно.

Вышеизложенное касается задачи построения стратегии гарантированного управления эксплуатацией, в которой поиск необходимо осуществлять в условиях, когда предел возможных изменений $y(t)$ априори не определен, т.е. область $[b^-(t), b^+(t)]$ не задана. Из-за недостатка априорных сведений при решении этой задачи невозможно заранее установить функциональное соответствие между $y(t)$ и ожидаемыми результатами гарантированного управления эксплуатацией, т.е. априори определить $u^{opt}(\tau, y^*)$. Построение области $[b^-(t), b^+(t)]$ и формирование искомой стратегии $u^{opt}(\tau, y^*)$ в решаемой задаче требуется осуществлять на основе данных, получаемых в процессе управления эксплуатацией. Найти в такой ситуации глобально оптимальную стратегию управления чрезвычайно трудно. Для преодоления возникающих здесь трудностей можно аппроксимировать глобально-оптимальную стратегию управления в совокупности локально-оптимальных стратегий. При этом каждая из локально-оптимальных стратегий для уменьшения ошибки аппроксимации должна быть адаптивной, т.е. обладать способностью к улучшению по мере накопления данных об изменениях $y(t) \in Y(t)$. Рассмотрим задачу поиска адаптивной локально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией с использованием минимаксного прогноза состояния технического объекта. Пусть управление эксплуатацией СММ состоит в проведении в фиксированные моменты времени $\{\tau_i\}_{i=0}^p, \tau_i \in T$ контрольных измерений или совмещенных с контролем регулировок $y(t)$. При этом на интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T, k < p$ можно без ущерба нормального функционирования объекта лишь контролировать $y(t)$. Другими словами, существует некоторый интервал, где заведомо известно, что регулировки $y(t)$ не потребуются. Этот интервал $[\tau_0, \tau_k]$ можно назвать интервалом накопления информации. Далее, пусть относительно ошибки контроля $e(t)$ известно только, что она лежит в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. Функция потерь $H(y)$ задана. Затраты на проведение одной регулировки составляют χ . Требуется найти такую стратегию управления эксплуатацией, реализация которой обеспечивает гарантированный минимум эксплуатации потерь на множестве T .

Поставленная задача может быть представлена как:

$$g^* = \inf_{r \in R} \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \left\{ \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} H(A, r, t) dt + w_i \chi \right\},$$

где B^-, B^+ – параметры функций $b^-(t)$ и $b^+(t)$ $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t), t > \tau_i, i \geq k$.

$$w_i = \begin{cases} 0, & r \notin R, \\ 1, & r \in R, \end{cases} \quad i = \overline{k, p}.$$

Алгоритм решения задачи состоит в следующем:

1. На интервале $[\tau_0, \tau_k] \in T$ по результатам измерений случайного процесса $y(t)$ с помощью одного из алгоритмов минимаксного прогноза состояния строятся $b^-(t)$ и $b^+(t)$, т.е. определяются параметры B^- и B^+ ;

2. Вычисляются g^* и соответствующие ему r (+

если $r \notin R$, то регулировка $y(t)$ в момент τ_k не проводится);

3. Осуществляется контрольное измерение $y(t)$ в момент τ_{k+1} с помощью одного из алгоритмов минимаксного прогноза состояний уточняются B^- и B^+ ;

4. Повторяется пункт 2 для момента τ_{k+1} (определяется необходимость регулировки $y(t)$ в момент τ_{k+1});

5. Процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока $\tau_{k+1} \in T$.

Предложенный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма можно оценить по критерию «жизнеспособности», в качестве которого здесь можно применить отношение значений функционала S_T на соседних интервалах $[\tau_{i-1}, \tau_i]$ и $[\tau_i, \tau_{i+1}]$.

Другой разновидностью решаемой задачи является задача построения $u^{opt}(\tau, y^*)$ по критерию гарантированного времени безотказного функционирования следующим образом.

Пусть гарантированное управление эксплуатацией состоит в проведении в некоторые моменты времени $\tau_i \in T, i = 0, 1, \dots$ контрольных измерений и регулировок $y(t)$ или только контрольных измерений $y(t)$. Ошибки контроля лежат в пределах $[c_1(t), c_2(t)]$. На интервале $[\tau_0, \tau_k]$ проводить регулировки $y(t)$ не требуется. Необходимо определить стратегию управления эксплуатацией, гарантирующую безотказность функционирования СММ при условии, что время между двумя управлениями будет не меньше ΔT . При этом, если $y(t) \in D$, где D – заданная область, то объект функционирует нормально.

Сформулированная задача может быть представлена в виде

$$\tau_{i+1}^* = \max_{r \in R} \min_{A=B^-, B^+} \{ \tau : y(A, r, \tau) \notin D \},$$

при $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$, где B^-, B^+ – параметры функций $b^-(t)$ и $b^+(t)$, $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t), t > \tau_i, i \geq k$.

Алгоритм решения этой задачи состоит в следующем:

1. По данным контроля $y(t)$ на интервале $[\tau_0, \tau_k]$ определяются параметры B^- и B^+ ;

2. Вычисляются τ_{k+1}^* и величина $r \in R$ для τ_k (если $r \notin R$, то регулировка в момент τ_k не проводится);

3. Если $\tau_{k+1}^* - \tau_k \geq \Delta T$, то осуществляется контрольное измерение $y(t)$ в момент τ_{k+1}^* , с помощью минимаксного прогноза уточняются B^- и B^+ (при $\tau_{k+1}^* - \tau_k \leq \Delta T$ формирование $u^{opt}(\tau, y^*)$ завершается);

4. Повторяется пункт 2 для τ_{k+2}^* (если $r \notin R$, то регулировка в момент τ_{k+1}^* не проводится);

Далее процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока $\tau_{i+1}^* - \tau_i \geq \Delta T$.

Нетрудно заметить, что представленный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма, как и описанного выше, можно оценить, сравнивая гарантированное время безотказного функционирования СММ без управления эксплуатацией с полученным при применении предложенного алгоритма.

Созданные с использованием такого подхода

алгоритмы формирования $u^{opt}(\tau, y^*)$ достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления эксплуатацией, гарантирующую безотказность и высокое качество функционирования МТО на интервале T . При этом в ряде ситуаций, в частности, при наличии большого числа ограничений на время проведения, характер и величину управляющих воздействий локально-оптимальная стратегия гарантированного управления эксплуатацией может совпадать с глобально-оптимальной стратегией.

Существует также возможность и аппаратной реализации указанных алгоритмов. Примером технического устройства, позволяющим решать задачу поиска максиминной стратегии управления эксплуатацией может служить устройство для гарантированной экстраполяции линейных процессов. В зависимости от конкретных условий практически могут быть найдены и другие технические решения для реализации предложенных алгоритмов.

Алгоритм формирования стратегии гарантированного управления эксплуатацией СММ

Функционирование в жестких условиях и требование гарантии безотказности определяют стратегию (правило) управления эксплуатацией, отличную от ранее известных. Любые исследования, направленные на разрешение возникающих здесь задач и проблем, оправданы. К сожалению, возникающие здесь задачи и проблемы не получили соответствующих их важности и актуальности отражения в научных исследованиях.

Управление эксплуатацией, вообще говоря, сводится к решению группы задач, относящихся, преимущественно, к задачам синтеза [1, 2, 6, 9, 15].

Локальный характер $u^{opt}(\tau, y^*)$ не позволяет говорить о том, что все возможности по гарантированному управлению эксплуатацией используются полностью и наиболее рациональным образом. Естественно, хотелось бы иметь достаточно общий метод («алгоритм»), который позволял бы находить глобально-оптимальную стратегию гарантированного управления эксплуатацией, т.е. последовательность управляющих воздействий, обеспечивающих безотказность и высокую эффективность функционирования СММ на основе полного использования всех возможностей управления и исходной информационной базы. В данном разделе предпринята попытка разработки такого метода.

Наиболее общим и естественным критерием оптимальности гарантированного управления эксплуатацией является критерий, имеющий экономическую природу [1, 5, 8]. В конечном счете, мы всегда стремимся так эксплуатировать объект, чтобы суммарный эффект от его использования во время эксплуатации был бы максимальным. Такие показатели, как гарантированный уровень работоспособности объекта или гарантированное время безотказного функционирования лишь косвенным образом характеризуют этот эффект.

Объективно выразить количественное соответствие здесь практически невозможно. Более содержательные сведения с этой точки зрения могут

быть получены при использовании экономических показателей. Одним из таких показателей является, в частности, показатель гарантированного уровня общих материальных затрат S_Γ .

По величине S_Γ является более общим по сравнению с другими показателями (неэкономического характера) как мера качества функционирования ПЛИС СММ на множестве T . Отсюда вытекает последовательность его использования в качестве критерия оптимальности при построении общего алгоритма формирования глобально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией на всем интервале T , т.е. общего минимаксного алгоритма решения задачи (1).

$$g^* = \text{extr } G(y^*, u, t), \quad \left\{ \begin{array}{l} u(\tau, y^*): \tau \in T, y^* \in Y^*, \\ u \in U \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где g^* – значение критерия, соответствующее оптимальной стратегии управления эксплуатацией.

Для формирования искомой стратегии $u_g^{opt}(\tau, y^*)$, учитывая аддитивность критерия S_Γ , можно применить принцип оптимальности Беллмана [3, 7]. Аддитивность (мультипликативность) критерия оптимальности открывает путь к преобразованию задачи поиска оптимального управления на основе принципа оптимальности Беллмана. При этом нахождение стратегии $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ можно рассматривать как многошаговый управляемый процесс принятия решений для синтеза оптимальной системы (управление), где S_Γ – финальная функция потерь (сумма потерь, связанных со всеми шагами принятия решений). За счет аддитивности S_Γ на основе принципа оптимальности Беллмана может быть достигнута глобально-оптимальная стратегия гарантированного управления эксплуатацией $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ пошаговой минимизацией критерия S_Γ . Соответствующие алгоритмы являются аддитивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают известную обстановку, чем улучшают процесс принятия решений. Они, как правило, могут быть реализованы в рекуррентном виде [1, 2, 15].

Для составления рекуррентных уравнений решение задачи формирования $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ необходимо построить пространство состояний [13]. Иначе говоря, необходимо определить совокупность координат, содержащих применительно к задаче (1) все сведения об аппаратуре СММ на данном интервале времени вне зависимости от его прошлого поведения. При этом следует учитывать возможные трансформации задачи (1), обусловленные видом представления прогнозируемых оценок $y(t)$. Так, использование алгоритмов гарантированного прогноза дает возможность получать искомые оценки как интервальные (функции $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t), t \in T \setminus T_p$). Результат решения задачи прогноза с помощью рекуррентного минимаксного фильтра есть точечная оценка $y(t), t \in T \setminus T_p$ и т.п. Соответственно, с учетом возможностей гарантированного прогноза, задача (1) трансформируется в задачу (2).

$$g^* = \min_{u(t) \in U(t)} \max_{b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)} G(y, u, t),$$

или

$$g^{**} = \max_{u(t) \in U(t)} \min_{b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)} G^*(y, u, t), \quad (2)$$

где $b^-(t)$ и $b^+(t)$ могут быть найдены по данным контроля $y(t)$.

При этом набор (B^-, B^+, t) , где B^+, B^- – матрицы, элементы которых задают область возможных вариаций коэффициентов a_{ij} в модели $y(t) = A \cdot F(t)$, ($A = \|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n, m}$ – матрица непрерывных детерминированных функций времени) гарантированно описывает на время t состояние СММ вне зависимости от его поведения в прошлом. Информационную характеристику СММ на интервале $[t, t_c] \in T, t \leq t_c$ можно представить как (B^-, B^+, t, t_c) . Применительно к решаемой задаче координаты B^-, B^+, t, t_c содержат все сведения об СММ вне зависимости от его прошлого поведения при $t, t_c \in T$, т.е. (B^-, B^+, t, t_c) можно рассматривать как информационное пространство состояний.

Если в качестве алгоритма прогноза, т.е. алгоритма определения состояния на интервале $[t, t_c]$, использовать рекуррентный минимаксный фильтр, то искомое информационное пространство состояний можно представить как набор (A^*, t, t_c) , где A^* – матрица минимаксных оценок коэффициентов a_{ij} модели $y(t) = A \cdot F(t)$.

Определение информационного пространства состояний СММ в виде (B^-, B^+, t, t_c) (или (A^*, t, t_c)) дает возможность построить алгоритм решения задачи (2) по критерию гарантированного уровня общих эксплуатационных потерь S_Γ на основе принципа оптимальности Беллмана.

Сначала рассмотрим алгоритм формирования $u_g^{opt}(t, y^*)$ для информационного пространства состояний вида (B^-, B^+, t, t_c) .

Пусть функция $S(B^-, B^+, t, t_c)$ характеризует предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией СММ в состоянии (B^-, B^+, t, t_c) при проведении оптимальной стратегии $u(t, y^*)$. Управляющие воздействия состоят в контроле и регулировке $y(t)$. Математическая модель регулировки представлена выражением $y_r^* = y^* + r$, где y_r^* – оценка состояния объекта после регулировки; y^* – оценка $y(t)$ до регулировки

Предельные материальные потери при отсутствии управления эксплуатацией на интервале $[t, t_c]$ для состояния (B^-, B^+, t, t_c) можно представить в виде

$$S_1(B^-, B^+, t, t_c) = \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \int_t^{t_c} H(y, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $H(y, \tau)$ – функция потерь.

Если в момент времени $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$ произведено измерение $y(t)$, связанное с затратами μ , и получено значение $z(t) = y(t) + e(t)$ ($e(t)$ – случайная ошибка измерения, стохастические свойства которой не определены, а задана лишь область ее возможных вариаций), то информационное состояние СММ будет $(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c)$, где \tilde{B}^-, \tilde{B}^+ – матрицы предельных значений коэффициентов a_{ij} , полученные по результатам проведенного измерения. При этом предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией СММ, составляет

$$S_2(B^-, B^+, t, t_c) = \{S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c)\} \quad (4)$$

Если в момент времени $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$ осуществляется регулировка $y(t)$ (измерение $y(t)$ на $r \in R$), затраты на проведение которой составляют k , то предельные материальные потери для информационного состояния (B^-, B^+, t, t_c) можно описать как

$$S_3(B^-, B^+, t, t_c) = \{S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c)\} \quad (5)$$

где B_r^-, B_r^+ – матрицы предельных значений коэффициентов a_{ij} с учетом изменения состояния ПЛИС СММ после регулировки.

Исходя из полученных зависимостей (3), (4), (5) можно сформировать на основе принципа оптимальности Беллмана рекуррентные уравнения для нахождения оптимальной стратегии управления эксплуатацией $u(t, y^*)$ по критерию S_Γ

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} (S_i) \quad (6)$$

$$S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c) \quad (7)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (8)$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (9)$$

Значения i , на которых достигается минимум в (6), и значения r , на которых достигается общий минимум в (8) и (9), являются функциями (B^-, B^+, t, t_c) и описывают искомую оптимальную в смысле критерия S_Γ стратегию гарантированного управления эксплуатацией $u(t, y)$.

В приведенных соотношениях фигурируют параметры B^-, B^+ , получение которых связано с использованием определенной прогнозирующей процедуры. В качестве такой процедуры может служить один из алгоритмов реализации метода гарантированного прогноза. Решение уравнений (6), (7), (8), (9) по существу является задачей динамического программирования.

При этом для формирования $u_g^{opt}(t, y^*)$ важнее определить характер и время проведения управляющих воздействий, чем точные числовые значения $S(B^-, B^+, t, t_c)$, обращающие в минимум уравнения (6), (7), (8), (9). Поэтому целесообразно для решения полученных уравнений воспользоваться методом приближений в пространстве политик (стратегий) [1].

Рассмотрим стратегию управления, которая не содержит ни одного измерения или регулировки. Предельные материальные потери при такой стратегии составляют

$$S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c) = S_1(B^-, B^+, t, t_c)$$

Далее рассмотрим стратегию, содержащую не более одного измерения или регулировки. Предельное значение материальных затрат при этой стратегии получается как результат подстановки функции в правую часть уравнения (6) или

$$S \equiv S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c), S^{(1)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c).$$

Вообще, при рассмотрении стратегий управления

эксплуатацией $u(\tau, y^*)$, содержащих не более χ вмешательств, предельные материальные потери $S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c)$, можно вычислить при подстановке $S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c)$ в правую часть выражения (6), причем

$$0 \leq S^{(N)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c), N = 1, 2, \dots$$

Следовательно,

$$\exists \lim_{N \rightarrow \infty} S^{(N)}(B^-, B^+, t, t_c) = S^{(\infty)}(B^-, B^+, t, t_c) \geq 0,$$

где $S^{(\infty)}(B^-, B^+, t, t_c)$ является решением уравнений (6).

Использование идей метода приближений в пространстве стратегий дает возможность построить по уравнениям (6), (7), (8), (9) таблицу оптимальных в смысле критерия S_T управляющих воздействий, определяемых набором (B^-, B^+, t, t_c) . На основании этой таблицы и в зависимости от результатов управления можно сформировать адаптивную стратегию $u_g^{opt}(\tau, y^*)$. Алгоритм поиска $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ при этом состоит в следующем:

1. По данным априори функции потерь $H(y)$ и наборам (B^-, B^+, t, t_c) находится путем решения уравнений (7) начальное приближение $S^{(1)}(B^-, B^+, t, t_c)$.

2. Путем решения уравнений (6), (8) и (9) находится следующее приближение $S^{(1)}(B^-, B^+, t, t_c)$.

3. Путем решения уравнений (6), (7), (8) и (9) определяется новое приближение $S^{(2)}(B^-, B^+, t, t_c)$.

4. Процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока

$$S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c), \chi = 2, 3, 4, \dots$$

5. С помощью $S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c)$ строится таблица оптимальных управляющих воздействий, определяемых (B^-, B^+, t, t_c) .

6. По полученной таблице для данного набора (B^-, B^+, t, t_c) находятся характеристики первого управляющего воздействия на интервале эксплуатации T , т.е. начинается формирование $u_g^{opt}(\tau, y^*)$.

7. По полученной таблице определяются характеристики следующего управления эксплуатацией СММ для нового информационного состояния, наступившего после проведения очередного управляющего воздействия.

8. Процесс повторяется, начиная с пункта 7, до конца эксплуатации СММ, т.е. до завершения формирования стратегии $u_g^{opt}(\tau, y^*)$.

Основное содержание изложенного алгоритма составляет построение таблицы оптимальных профилактических воздействий, определяемых набором (B^-, B^+, t, t_c) . По существу эта таблица есть непосредственный результат решения уравнений (6), (7), (8) и (9) путем приближений в пространстве стратегий и поэтому ее построение в вычислительном аспекте поиска $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ представляет наибольший интерес. Как известно, основным недостатком методов динамического программирования является высокая трудоемкость вычислений («проклятье размерности» по словам Р. Беллмана).

Этот недостаток накладывает известные ограничения на класс ЭВМ, пригодных для решения уравнений (6), (7), (8) и (9). Вместе с тем, существует

достаточно простой и эффективный прием, позволяющий уменьшить размерность рассматриваемой задачи. Это линейная интерполяция. За счет линейной интерполяции при формировании $S(B^-, B^+, t, t_c)$ можно без существенного ущерба для точности ограничить число рассматриваемых точек области определения аргументов B^-, B^+, t, t_c . (Использование линейной интерполяции при построении $S(B^-, B^+, t, t_c)$ означает, что указанная функция точно вычисляется только при некоторых значениях ее аргументов, остальные значения $S(B^-, B^+, t, t_c)$ находятся с помощью линейной интерполяции). Размерность рассматриваемой задачи можно уменьшать только за счет введения в алгоритм поиска $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ процедуры пересчета таблицы оптимальных управляющих воздействий по мере поступления данных контроля $y(t)$.

Сущность такой процедуры состоит в том, чтобы на каждом шаге формирования $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ сужать область определения аргументов функции $S(B^-, B^+, t, t_c)$ в соответствии с данными контроля $y(t)$. Таким образом, не снижая точность расчета, можно по мере формирования искомого стратегии $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ ограничивать число наборов (B^-, B^+, t, t_c) , участвующих в вычислении $S(B^-, B^+, t, t_c)$. Организация рассматриваемой процедуры не вызывает затруднений и может быть осуществлена по описанной выше схеме расчета таблицы оптимальных профилактик.

В зависимости от имеющихся ограничений на управление эксплуатацией СММ (списания множества управляющих воздействий V) соотношения (6), (7), (8) и (9) могут быть преобразованы. Так, например, если $V \equiv R$ (управление эксплуатацией состоит только в регулировках $y(t)$), то уравнения для нахождения $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ приобретают вид:

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2} (S_i) \\ S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c) \\ S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\}$$

Если при управлении эксплуатацией контрольные измерения и регулировки $y(t)$ совмещены, то искомую стратегию $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ можно определить как результат решения уравнений

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2} (S_i) \\ S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c) \\ S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \mu + \inf_{r \in R} \inf_{B_r^-, B_r^+} S(\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\},$$

где $\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+$ – матрицы предельных коэффициентов a_{ij} .

Если допустимыми управляющими воздействиями являются контрольные измерения или совмещенные с контролем регулировки, то уравнения для нахождения могут быть представлены как

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} (S_i) \\ S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c) \right\},$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + \omega k \right.$$

$$\left. + \inf_{r \in R} \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\},$$

где $\omega = \begin{cases} 1, & r(\tilde{t}) \in R, \\ 0, & r(\tilde{t}) \notin R. \end{cases}$

Нетрудно заметить, что приведение в соответствие с условиями управления эксплуатацией уравнений (6), (7), (8) и (9) не вносит принципиальных изменений в описанный ранее алгоритм их решения. Поэтому нет необходимости в его дополнительном рассмотрении.

В условиях существенной ограниченности и неопределенности исходной совокупности сведений уравнения или их модификации могут служить основой для решения задач поиска. При этом алгоритм формирования искомой стратегии гарантированного управления эксплуатацией СММ отличается достаточной общностью.

Следуя данному алгоритму, можно строить гарантированную стратегию управления эксплуатацией как контролируемых, так и неконтролируемых технических элементов СММ при управлении случайным процессом деградации параметров $y(t)$ в форме отличной от избранной или при применении минимаксных алгоритмов прогноза не относящихся к алгоритмам реализации метода гарантированного прогноза достаточно только соответствующим образом описать информационное пространство состояний, чтобы уравнения (6), (7), (8), (9) или их модификации были бы пригодны для формирования $u_g^{opt}(\tau, y^*)$. (В этом смысле использование марковской аппроксимации $y(t)$ приводит к тривиальному случаю: требуемое описание непосредственно представлено в виде самой модели $y(t)$).

Изменение условий оптимальности выбора $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ также не нарушает общности предложенного алгоритма. Соответствующие задание функции потерь позволяет здесь переходить от одного критерия оптимальности в другому.

В качестве примера использования уравнений вида (6), (7), (8), (9) для нахождения $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ при представлении информационного пространства состояний в форме отличной от (B^-, B^+, t, t_c) , можно привести уравнения, определяющие $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ в зависимости от набора (A^*, t, t_c) . (Как отмечалось выше указанный набор составляет информационное пространство состояний СММ, обусловленное применением для прогнозирования состояния минимаксных алгоритмов. Данные уравнения могут быть записаны как

$$S(A^*, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} \quad (10)$$

$$S_1 = S(A^*, t, t_c) \quad (11)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(A^*, t, \tilde{t}) + \mu + \inf_{A^*} S(A^*, \tilde{t}, t_c) \right\}, \quad (12)$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(A^*, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(A^*, \tilde{t}, t_c) \right\}, \quad (13)$$

Также, как и управления (6), (7), (8), (9), соотношения (10), (11), (12), (13) могут быть преобразованы для приведения в соответствие с

имеющимися ограничениями на управление.

Решение уравнений (10), (11), (12), (13) несложно получить с помощью алгоритма формирования таблицы оптимальных управляющих воздействий, описанного выше.

Следует отметить, что применение рассмотренного алгоритма не требует на практике постоянного обращения при формировании $u^{opt}(\tau, y^*)$ к ЭВМ, мощность которой достаточна для расчета таблицы оптимальных управляющих воздействий.

Методика расчета целесообразных вариантов стратегий управления эксплуатацией СММ

Одним из средств, обеспечивающих повышение эффективности функционирования систем морского мониторинга, является создание методологии как стратеги исследования на основе научных методов обоснования решений, которые призваны устранить противоречия, возникающие между выдвигаемыми требованиями к таким системам и возможностями их достижения.

Максимальная эффективность применения средств освещения обстановки достигается, как правило, при комплексном использовании стационарных и автономных средств обнаружения с учетом их показателей эффективности.

Понятие «повышение надежности и стойкости к внешним воздействиям» аппаратуры СММ включает в себя проведение таких мероприятий, результатом которых является улучшение количественных показателей, прямо или косвенно характеризующих данное свойство, а именно вероятности безотказной работы, интенсивности отказов, времени восстановления ресурса и сроков службы, комплексных показателей надежности и т.д. Надежность аппаратуры СММ определяется надежностью микросхем, диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, печатных плат, разъемов и вспомогательных элементов схем. Расчет надежности аппаратуры СММ, как правило, сводят к определению зависимости вероятности их безотказной работы от времени эксплуатации $P(t)$ по известным надежностным характеристикам составляющих их элементов (блоков) узлов и т.д.).

Вообще говоря, большинство типов аппаратуры, используемой в составе СММ, поддается восстановлению и в самом общем случае при априорной оценке надежности следует учитывать возможности восстановления работоспособного состояния, включающие как техническое, так и организационно-материальное обеспечение [1, 6, 9, 15].

На основе решения частных задач определения $u^{opt}(\tau, y^*)$ можно составить общую методику расчета наиболее целесообразных вариантов стратегий управления, исходя из реальных возможностей управления эксплуатацией и информационного обеспечения технических элементов СММ. Данная методика устанавливает порядок расчета проведения воздействий по управлению эксплуатацией и состоит в следующем.

1. Набор алгоритмов позволяет находить математическую модель прогнозируемого процесса в ситуациях, когда неизвестны стохастические характеристики возмущающих факторов, относительно ошибок измерения здесь обычно

бывает заданы только границы их возможных вариаций. Структура модели $y(t)$ является известной и удовлетворяющей требованию адекватности, как правило, это $y(t) = A \cdot F$, где $F = \{f_i(t)\}_{i=0}^n$ – набор детерминированных функций времени, A – матрица случайных (неопределенных) коэффициентов. Данное представление можно рассматривать как разложение случайного процесса по детерминированному базису. Иначе говоря, любой случайный процесс может быть описан таким образом [15]. При этом ошибки модели, которые нельзя рассматривать как случайные [1, 2], здесь могут быть учтены.

2. Определение модели прогнозируемого процесса $y(t)$ позволяет перейти к решению задач первого уровня гарантированного управления эксплуатацией. Суть таких задач состоит в определении критерия оптимальности управления. Наиболее пригодными являются показатели гарантированного уровня эксплуатационных потерь и гарантированного времени безотказной работы. В условиях ограничений стратегия гарантированного управления эксплуатацией может быть вырожденной. Вырожденность стратегии гарантированного управления эксплуатацией предполагает однократную и первоначальную установку параметров СММ на уровень, необходимый для обеспечения безотказности и высокой эффективности функционирования на интервале T . Естественно, что здесь в исходных данных не фигурируют наблюдения $y(t)$. Информационная база для построения вырожденной стратегии гарантированного управления эксплуатацией содержит только априорные сведения относительно $y(t)$. Такие сведения практически всегда могут быть даны в виде ограничений на прогнозируемый процесс, в частности, так $y(t) \in D$, $\forall t \in T$, где D – область работоспособных состояний.

3. Определение критерия оптимальности для гарантированного управления эксплуатацией завершает решение задач первого уровня общей проблемы управления эксплуатацией технических элементов СММ. Следующий уровень возникающих здесь задач связан с построением информационной базы для управления.

Такая база может быть построена с применением алгоритмов обработки данных наблюдений за состоянием СММ для прогнозирования изменения их состояния. Следует отметить, что применение статистических методов обработки наблюдений для прогнозирования состояния в данной ситуации является неправомерным [6]. Расчет на «наихудший» случай здесь позволяет находить решение, адекватное решениям информационного обеспечения, т.е. получать оценки $y(t), t \in T \setminus T_p$ только на основе имеющихся данных без всякого их домысливания или интерпретации.

В зависимости от возможностей управления и требований к виду представляемых результатов прогноза состояния ПЛИС СММ можно выбрать один из пяти алгоритмов минимаксного прогнозирования $y(t), t \in T \setminus T_p$.

4. Третий уровень задач гарантированного управления эксплуатацией СММ состоит в определении, собственно, наиболее рациональной стратегии управления, т.е. в построении $u_g^{opt}(\tau, y^*)$.

Такая стратегия (оптимальная в минимаксном смысле) при условии успешного решения задач предыдущих уровней (определение модели $y(t)$, выбор критерия оптимальности) может быть найдена по алгоритмам. При этом в зависимости от возможностей управления и имеющейся вычислительной техники можно строить локально-оптимальную или глобально-оптимальную стратегию $u(\tau, y^*)$.

Эксплуатация элементной базы СММ с низкими характеристиками надежности приводит обычно к значительным потерям и существенно снижает эффективность их использования. Однако сами по себе высокие характеристики надежности еще не гарантируют столь же высокой эффективности.

В связи с этим обстоятельством возникает необходимость разработки научно обоснованной стратегии эксплуатации или технического обслуживания. Естественным выглядит стремление обеспечить оптимальную стратегию эксплуатации, позволяющую повысить эффективность за счет рациональной организации технического обслуживания.

Заключение

Стратегия эксплуатации строится с учетом объективных характеристик надежности (безотказности и ремонтпригодности), особенностей исследуемой системы (например, характера возникновения отказов, наличия средств контроля работоспособности, структуры системы) и условий эксплуатации (климатических условий, наличия средств предотвращения и ликвидации отказов, ограничений на моменты проведения контрольных, диагностических и восстановительных работ и т.п.) [15]. Как и при решении любой оптимизационной задачи для синтеза стратегии эксплуатации необходим соответствующий критерий оптимальности. Следовательно, должен быть задан количественный показатель (критерий), по которому можно судить о качестве выбранной стратегии технического обслуживания и функционирования исследуемой системы. Как было показано выше, в качестве такого показателя принимается функционал, определенный на множестве возможных траекторий (реализаций) случайного процесса, описывающего изменение состояний системы во времени.

Для многих технических объектов, а особенно для разрабатываемой авторами системы морского мониторинга с элементами искусственного интеллекта [7–14], получение пессимистических результатов в задачах гарантированного управления эксплуатацией представляет значительно меньшую опасность, чем неоправданный оптимизм. В частности, если фактическое состояние аппаратуры СММ окажется хуже предсказания, то конечная цель гарантированного управления – обеспечение безотказности и высокой эффективности функционирования может быть вообще не достигнута. Вместе с тем, статистические алгоритмы обработки исходных данных и управления в достаточной мере разработаны и применяются на практике, в т. ч. и при решении задач управления эксплуатацией. Применение минимаксного принципа здесь, за исключением некоторых частных задач, было и остается мало известным. Это выдвигает на

первый план проблему построения и исследования общего комплекса методов и алгоритмов минимаксной обработки исходных данных и управления [6].

Возникает конфликтная ситуация, характерная для теории игр при игре с «природой» или «вездесущим и всезнающим противником». Приходится предполагать, что противник знает нашу стратегию и свою стратегию, в этих условиях, выбирает как наихудшую для нас (наилучшую для себя).

Для решения задачи выбора оптимальной стратегии управления в указанной ситуации используется принцип максимина (минимакса), гарантирующий получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях [15].

Естественно, что в более благоприятных

условиях найденная таким образом стратегия будет слишком пессимистической (дорогостоящей). Поэтому полученные нами результаты будут полезны, прежде всего, при синтезе стратегии эксплуатации сложных объектов, а именно автономной СММ [7, 9–11]. Специфика СММ такова, что основной задачей систем контроля и диагностирования ставится здесь не выявление и локализация отказов, а их предотвращение.

Отметим, что сложность задач гарантированного управления эксплуатацией автономной СММ не позволяет рассчитывать на получение достаточно общих аналитических решений. Пригодные для практики решения здесь могут быть найдены лишь с применением интеллектуальных информационных технологий, т.е. методов вычислительной математики и компьютерного эксперимента

Литература

1. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 200 с.
2. Андриухин А.В., Пятакович В.А. Экономическая целесообразность замены корабельного оборудования // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2007. – Т. 2. – С. 203–204.
3. Беллман Р., Энджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 205 с.
4. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. М.: Наука, 1972. – 336 с.
5. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Новые технологии формирования системы мониторинга и идентификации признаков полей морских объектов: Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2017. № 4 (38) Том 3. С. 127–131.
6. Пятакович В.А. Расчет надежности и эффективности функционирования гидроакустической аппаратуры нейрокспертной системы морского мониторинга // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики Серия «Естественные и технические науки» – М: Изд-во «Научные технологии», 2017. № 10. – С. 37–42.
7. Пятакович В.А. Гарантированное управление надежностью интеллектуальной системы классификации морских целей в условиях неопределенности / Двойные технологии. – М.: 2018. № 4 (85). С. 99–103.
8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.
9. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: Монография. – Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2018. – 263 с.
10. Патент № 2659100 РФ Способ формирования и применения широкомасштабной радиогидроакустической системы мониторинга, распознавания и классификации полей, генерируемых источниками в морской среде: / Василенко А.М., Пятакович В.А., Мироненко М.В. Опубл. 28.06.2018.
11. Патент № 2681242 РФ Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей: / Пятакович В.А. Опубл. 05.03.19.
12. Пятакович В.А., Пятакович Н.В., Пашкеев С.В. Расчет эффективности средств наблюдения как информационных источников экспертной интеллектуальной системы контроля морских акваторий / Стратегическая стабильность. – М.: 2018. № 3 (84). – С. 43–48.
13. Пятакович В.А., Пятакович Н.В., Пашкеев С.В. Применение нейросетевых технологий искусственного интеллекта в структуре системы мониторинга и контроля морской среды средствами Военно-Морского Флота / Стратегическая стабильность. – М.: 2018. № 3 (84). С. 53–62.
14. Пятакович В.А. Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий / Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 169–176.
15. Розенбаум А.Н., Дорофеев А.И., Кислова И.И. Прогнозирование состояния при управлении эксплуатацией. – Владивосток: ДВГТУ, 1995. – 134 с.

References

1. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. Upravlenie ekspluatatsiyey sistem otvetstvennogo naznache-niya [Managing the operation of responsible systems] – Vladivostok: Dal'nauka, 2000. – 200 s.
2. Andriukhin A.V., Pyatakovich V.A. Ekonomicheskaya tselesoobraznost' zameny korabel'nogo oborudovaniya [Economic feasibility of replacing ship equipment] // Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». – Penza: PGU, 2007. – T. 2. – S. 203–204.
3. Bellman R., Endzhel E. Dinamicheskoe programirovanie i uravneniya v chastnykh proizvodnykh [Dynamic programming and partial differential equations]. M.: Mir, 1974. 205 s.
4. Druzhinin G.V. Nadezhnost' avtomatizirovannykh system [Reliability of automated systems]. M.: Nauka, 1972. – 336 s.

5. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Rychkova V.F. Novye tekhnologii formirovaniya sistemy monitoringa i identifikatsii priznakov poley morskikh ob"ektov [New technologies to build a system for the monitoring and identification of signs of fields belonging to seawater objects]: Morskije intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2017. № 4 (38) Tom 3. S. 127–131.
6. Pjatakovich V.A. Raschet nadezhnosti i jeffektivnosti funkcionirovaniya gidroakusticheskoy apparatury nejroekspertnoj sistemy morskogo monitoringa [Calculation the reliability and functioning efficiency of the hydroacoustic equipment in the neural expert marine monitoring system] // Sovremennaja nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki Serija «Estestvennye i tehicheskie nauki» – M: Izd-vo «Nauchnye tekhnologii», 2017. № 10. – S. 37–42.
7. Pyatakovich V.A. Garantirovannoe upravlenie nadezhnost'yu intellektual'noy sistemy klassifikatsii morskikh tseley v usloviyakh neopredelennosti [Guaranteed management of the reliability of the intelligent system of classification of marine goals under conditions of uncertainty] / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 4 (85). S. 99–103.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Raspoznavanie i klassifikaciya istochnikov formirovaniya polej razlichnoj fizicheskoy prirody v morskoy srede [Recognition and classification of the sources of the formation of fields of different physical nature in the marine environment]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2017. 255 p.
9. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Nejrosetevye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah obnaruzheniya i operativnoj identifikacii morskikh celej [Neural network technologies in intelligent detection systems and operational identification of marine targets]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2018. 263 p.
10. Patent № 2659100 RF Sposob formirovaniya i primeneniya shirokomasshtabnoy radiogid-roakusticheskoy sistemy monitoringa, raspoznavaniya i klassifikatsii poley, generirue-mykh istochnikami v morskoy srede [large-scale radio-hydro acoustic system formation and application method for monitoring, recognizing and classifying the fields generated by sources in the marine environment]: / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Mironenko M.V. Opubl. 28.06.2018.
11. Patent № 2681242 RF Intellektual'naya sistema obnaruzheniya i klassifikatsii morskikh tseley [Intelligent system for detecting and classifying of marine targets]: / Pyatakovich V.A. Opubl. 05.03.19.
12. Pyatakovich V.A., Pyatakovich N.V., Pashkeev S.V. Raschet jeffektivnosti sredstv nablyudeniya kak informatsionnykh istochnikov ekspertnoj intellektual'noy sistemy kontrolya morskikh akvatorii [Calculation of the effectiveness of observation as information sources of the expert intelligent control system for marine areas] / Strategicheskaya stabil'nost'. – M.: 2018. № 3 (84). – S. 43–48.
13. Pyatakovich V.A., Pyatakovich N.V., Pashkeev S.V. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy is-kusstvennogo intellekta v strukture sistemy monitoringa i kontrolya morskoy sredy sredstvami Voенно-Morskogo Flota [Application of neural network technologies of artificial intelligence in the structure of the system of monitoring and control of the marine environment by means of the Navy] / Strategicheskaya stabil'nost'. – M.: 2018. № 3 (84). S. 53–62.
14. Pyatakovich V.A. Sistema klassifikatsii morskikh tseley na baze neyrosetevykh tekhnologiy [Marine target classification system based on neural network technologies] / Morskije intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 169–176.
15. Rozenbaum A.N., Dorofeev A.I., Kislova I.I. Prognozirovaniye sostoyaniya pri upravlenii ekspluatatsiey [Predicting the state of operation management]. – Vladivostok: DVG TU, 1995. – 134 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Александрович Пятакович, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток. Камский переулок, 6. e-mail: pva.877com@mail.ru

Valeriy A. Pyatakovich, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Director of research Laboratory. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok. 690062, Russia. e-mail: pva.877com@mail.ru

Александр Петрович Пурденко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Тактики военно-морского флота и военной истории. Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова. 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6 e-mail: app.59@mail.ru

Alexander P. Purdenko, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Associate professor of department of Tactics of the Navy and military history. Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov. Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: app.59@mail.ru

Виктория Феликсовна Рычкова, начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а. e-mail: rychkova@msun.ru

Victoria F. Rychkova, Director of the Department of Research and Innovation Activities Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi. 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia. e-mail: rychkova@msun.ru

Евгений Геннадьевич Филиппов, старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и электротехники, Дальневосточный федеральный университет. 690922, Россия, Приморский край, о. Русский. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

Evgenii G. Filippov, Senior Lecturer, Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Far Eastern Federal University. Russian island 690922, Primorsky Krai, Russia. e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.062
УДК 629.058.45:681.883.48

Метод повышения точности корреляционного лага на основе предварительной фильтрации сигналов на входе схемы слежения

В.В. Завьялов¹, В.А. Агапов²

¹Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. Целью работы является обоснование метода повышения точности корреляционного лага на основе предварительной фильтрации сигналов на входе схемы слежения. Показаны проблемы, решаемые с помощью корреляционных лагов. Проведен анализ основных уравнений корреляционных методов измерения скорости и структурных схем вычислительных устройств корреляционных лагов, основанных на этих методах. Показано, что при измерении продольной скорости судна на выходе схемы слежения (измеренная скорость) коррелятора даже в установившемся режиме слежения сигнал не равен нулю, в отличие от метода корреляции для измерения модуля полной скорости судна. Предлагается фильтровать сигналы на входах вычитателя с последующим интегрированием выходного разностного сигнала.

Для подтверждения работоспособности предложенного метода были разработаны схемы корреляторов. Измерители продольного измерителя скорости и модуля скорости на полной скорости судна. Получены динамические характеристики переходных процессов вычислительных устройств лагов, дисперсии входных и выходных сигналов схемы слежения. Представлены результаты теоретических расчетов относительных среднеквадратичных ошибок методов измерения продольной скорости и модуля абсолютной скорости, а также результаты, полученные в ходе моделирования, которые подтвердили эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: судно, корреляция, лаг, сигнал, коррелятор, множитель, вычитатель, фильтр, схема слежения, дисперсия, среднеквадратичная ошибка измерения скорости

The method for improving of accuracy of correlation lag based on pre-filtering of input tracking circuit signals

Viktor V. Zavyalov¹, Viktor A. Agapov²

¹Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi, ²Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. The aim of the work is to substantiate a method for increasing the accuracy of the correlation lag based on preliminary filtering of the signals at the input of the tracking circuit. The problems solved with the help of correlation lags are shown. The analysis of the basic equations of the correlation methods for measuring velocity and structural schemes of computing devices of the correlation lags based on these methods is carried out. It is shown that when measuring the ship's longitudinal speed at the output of the tracking circuit (measured speed) of the correlator, even in the steady tracking mode, the signal is not equal to zero, in contrast to the correlation method for measuring the module of the ship's full speed. It is proposed to filter the signals at the inputs of the subtractor with the subsequent integration of the output difference signal.

To confirm the operability of the proposed method, the longitudinal velocity meter and meter for the module of the full speed were simulated. The dynamic characteristics of the transients computing devices of the correlation lags, the dispersions of the input and output signals of the tracking circuits are obtained. The results of theoretical calculations of the relative mean square errors of the methods for measuring the longitudinal velocity and module of the full velocity are presented, as well as the results obtained during the simulation, which confirmed the effectiveness of the proposed method.

Key words: vessel, correlation, lag, signal, correlator, multiplier, sub-tractor, filter, tracking scheme, dispersion, mean square error of speed measurement

Введение

Совершенствование методов и морских средств измерения скорости корабля является одной из актуальных задач в решении проблем кораблевождения. Эти приборы предназначены для решения таких навигационных задач, как определение места судна при плавании по счислению, постановке на якорь, швартовке или для коррекции показаний других технических средств навигации. Повышение точности автономных средств навигации, к которым относятся гидроакустические лаги, в том числе и корреляционные (КГАЛ), в настоящее время является актуальной научной и конструкторской задачей. КГАЛ представляют собой измерительную систему, в которой скорость корабля определяется путем анализа корреляционной связи между случайными сигналами, принятыми на движущемся судне

приемными элементами, установленными параллельно диаметральной плоскости [1–3].

Постановка задачи

На современные корабли устанавливаются различные типы лагов (относительные и абсолютные), позволяющие с высокой точностью вести счисление и определять место корабля в море. Предполагается, что при прекращении по тем или иным причинам функционирования средств коррекции, требуемая точность плавания должна обеспечиваться автономными средствами кораблевождения, к числу которых относятся лаги. Информация о скорости корабля используется также для исключения методических погрешностей других ТСН: гирокомпаса, радиолокационных станций навигации и управления оружием, инерциальных навигационных систем.

Измерители относительной скорости (гидродинамические, индукционные), установленные на кораблях, далеко не в полной мере соответствуют повышенным требованиям современного кораблевождения. Главным недостатком гидродинамических и индукционных лагов заключается в том, что они являются относительными лагами. Кроме того, гидродинамические лаги нечувствительны к малым скоростям.

Современные модели КГАЛ, такие как линейка лагов «SAL-T(1–3)» с погрешностью измерения скорости 0,5% и рабочей глубиной H=300 метров под антенной и другие [4] – наряду с информацией об абсолютной (относительной) скорости судна позволяют одновременно получать информацию и о глубине под килем. В этих моделях реализуется взаимно автокорреляционный способ обработки амплитуд огибающих эхосигналов (АОЭС), принятых, как минимум, на две приемные антенны, для измерения скорости по линии расположения антенн.

С учётом того, что приемоизлучающие тракты КГАЛ мало отличаются друг от друга, будем рассматривать КГАЛ с различными способами измерения скорости, двухэлементными антеннами, непрерывным режимом излучения с гармоническими колебаниями и амплитудным детектированием огибающей эхосигналов.

Наиболее существенно отличаются друг от друга вычислительные устройства КГАЛ (корреляторы), которые и будем.

Создание конкурентно-способного корреляционного лага может быть осуществлено в основном только путем уменьшения его погрешностей.

Наиболее существенными методическими, а частично и инструментальными, погрешностями корреляционных лагов, требующими разработки специальных методов их уменьшения, являются флюктуационные. Одним из методов их уменьшения является фильтрация (интегрирование) сигнала схемы слежения (разности произведений соответствующих сигналов коррелятора.)

Целью работы является обоснование метода повышения точности корреляционного лага на основе предварительной фильтрации сигналов на входе схемы слежения.

Обоснование метода

Управляющий сигнал на выходе схемы слежения для взаимно автокорреляционного способа измерения продольной (курсовой) скорости (ВАКК) (Рис.1) записывается в виде [2]

$$U(\tau_2) = M[X(t) \cdot X(t + \tau_2) - X(t + \tau_2) \cdot Y(t + \tau_{TK})]. \quad (1)$$

При равенстве τ_2 и τ_{TK} наступает равенство функций и $V_x = V \cdot \cos C = X_0 / (2\tau_2)$, где $X(t)$ – сигнал на выходе первого приемного тракта, $Y(t + \tau_{TK})$ – сигнал на выходе второго приемного тракта, X_0 – половина расстояния между приемными антеннами, τ_2 – временная задержка в блоке БРЗ, τ_{TK} – временная задержка при которой уровень автокорреляционной функции (АКФ) сигналов любой антенны равен уровню взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов двух антенн при нулевом временном сдвиге.

функции (ВКФ) сигналов двух антенн, C – угол сноса корабля (Рис. 2).

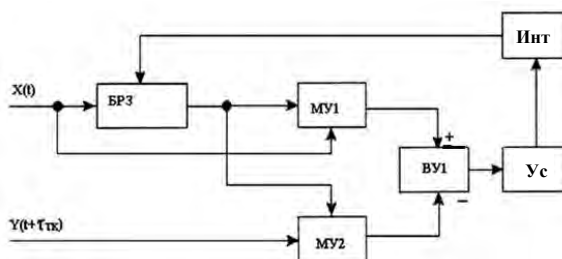


Рис. 1. Структурная схема коррелятора ВАКК-способа измерения скорости. Условные обозначения: БРЗ – блок регулируемого запаздывания, МУ – множительное устройство, ВУ – вычитающее устройство, Инт – интегратор, Ус – усилитель

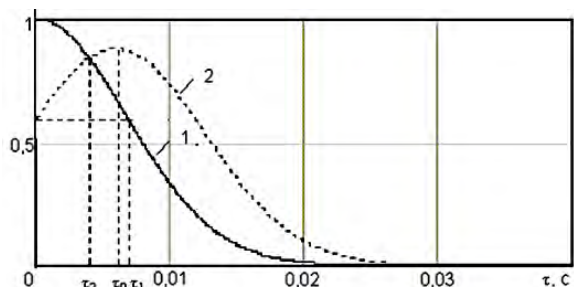


Рис. 2. Графики АКФ (1) и ВКФ (2) при $X_0=0,0175$ м, $V=5$ уз и $C=30^\circ$

Управляющий сигнал на выходе схемы слежения для взаимно автокорреляционного способа измерения модуля полной скорости (ВАКМ) записывается в виде [2] (Рис. 3)

$$U(\tau_1) = M[X(t) \cdot X(t + \tau_1) - X(t) \cdot Y(t + \tau_{TK})]. \quad (2)$$

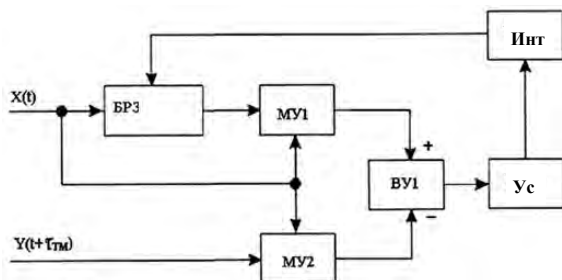


Рис. 3 – Структурная схема коррелятора ВАКМ-способа измерения скорости

При равенстве τ_1 и τ_{TK} наступает равенство функций и $V = X_0 / \tau_1$, где τ_1 – временная задержка в блоке БРЗ, τ_{TK} – временная задержка при которой уровень автокорреляционной функции (АКФ) сигналов любой антенны равен уровню взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов двух антенн при нулевом временном сдвиге.

Используя выражения (1) – (2), получим некоторые необходимые в дальнейшем соотношения между корреляционными задержками:

$$\text{при } C = 0^\circ, 2 \cdot \tau_2 = \tau_1, \tau_2 = \tau_1 / 2;$$

при $C \neq 0^\circ$, $\tau_0 = \tau_1 \cdot \cos C$, $\cos C = \tau_1 / (2 \cdot \tau_2)$.

При движении корабля без угла сноса сигналы с выходов вычитающих устройств корреляторов в установившемся режиме слежения будут соответственно равны для ВАКМ и ВАКК коррелятора:

$$\Delta U(\tau_1) = X(t) \cdot X(t + \tau_1) - X(t) \cdot Y(t + \tau_{\text{зм}}) = X(t) [X(t + \tau_1) - Y(t + \tau_{\text{зм}})], \quad (3)$$

$$\Delta U(\tau_2) = [X(t) \cdot X(t + \tau_2) - X(t + \tau_2) \cdot Y(t + \tau_{\text{зк}})] = X(t + \tau_2) \cdot [X(t) - Y(t + \tau_{\text{зк}})], \quad (4)$$

Анализ выражений (2), (3) показывает, что при $C = 0^\circ$ $\tau_1 = \tau_{\text{зм}}$, а $\Delta U(\tau_1) = 0$. Т.е. в установившемся режиме слежения при измерении модуля полной скорости на входе интегратора коррелятора ВАКМ-способа измерения скорости сигнал будет равен нулю.

При измерении продольной скорости, т.к. $\tau_2 = \tau_1 / 2 = \tau_{\text{зм}} / 2$, сигнал на входе интегратора ВАКК-способа измерения скорости будет равен

$$\Delta U(\tau_2) = X(t + \tau_{\text{зм}} / 2) \cdot [X(t) - Y(t + \tau_{\text{зк}})]. \quad (5)$$

Таким образом, даже в установившемся режиме слежения на входе интегратора сигнал не будет равен нулю.

Для подтверждения этих выводов проведено имитационное моделирование работы соответствующих корреляторов при работе от синусоидальных сигналов со следующими параметрами: амплитуда – 2 В, частота – 100 Гц, сдвиг сигналов – 90° . При таких параметрах задержки сигналов равны [3]:

$\tau_0 = \tau_1 = 2,5$ мс, $\tau_2 = 1,25$ мс, а выражения для сигналов записываются в виде:

$$X(t) = A \cdot \sin(\omega t), Y(t + \tau_1) = A \cdot \sin(\omega t - \pi/2),$$

$$Z(t) = X(t + \tau_2) = A \cdot \sin(\omega t - \pi/4). \quad (6)$$

Вид сигналов показан на графике (рис. 4).

На рисунке 5 показан вид сигналов на входах и выходе вычитающего устройства при измерении продольной скорости, характеристика которых описываются выражениями (7).

$$X1(t) = X(t) \cdot Z(t), Y1(t) = Y(t + \tau_{\text{зк}}) \cdot Z(t), \quad (7)$$

$$RK(t) = X1(t) - Y1(t).$$

На рисунке 6 показан вид сигналов на входах и выходе вычитающего устройства при измерении модуля полной скорости, характеристика которых описываются выражениями (8)

$$X2(t) = X(t) \cdot Y(t + \tau_1), Y2(t) = X(t) \cdot Y(t + \tau_1), \quad (8)$$

$$RM = X2(t) - Y2(t).$$

В результате анализа структурных схем (рис. 1, 3) и алгоритмов работы КГАЛ, выражения (2), (3) – (5), сделан вывод, что амплитуда сигнала рассогласования на входе интегратора при ВАКК-способе измерения скорости в установившемся режиме слежения не равна нулю.

Это приводит к увеличению пульсаций измеренной задержки при одинаковых параметрах интеграторов у ВАКК и ВАКМ корреляторов.

Одним из вариантов решения этой проблемы и, как следствие, снижения дополнительных пульсаций на выходе коррелятора, т.е. снижения величины флюктуационных погрешностей измерения продольной скорости судна, может быть предварительная фильтрация сигналов на входе вычитающих устройств корреляторов, при сохранении величин их постоянных времени.

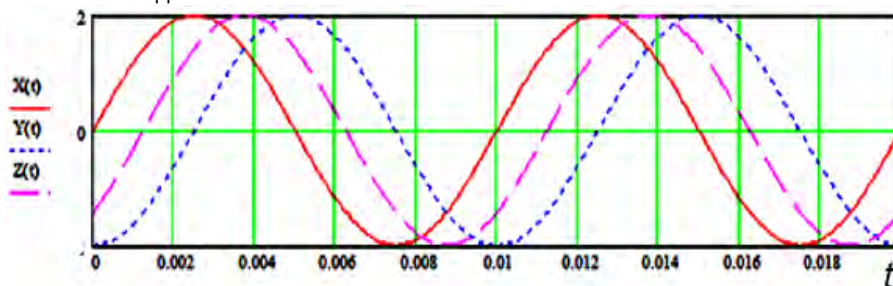


Рис. 4. Вид синусоидальных сигналов для моделирования работы соответствующих корреляторов

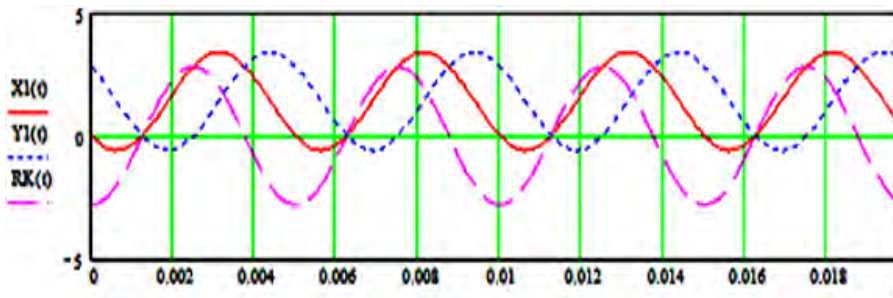


Рис. 5. Результат имитационного моделирования работы ВАКК-коррелятора

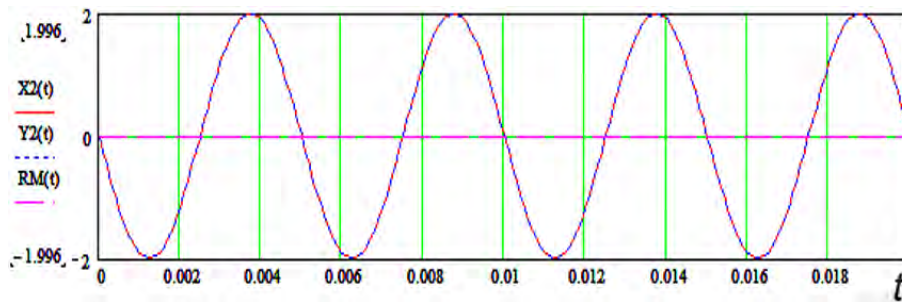


Рис.6. Результат имитационного моделирования работы ВАКМ-коррелятора

Вычислительный эксперимент

В соответствии с этими выводами, в пакете прикладных программ SciLab-5.5.2, были синтезированы функциональные схемы моделирования корреляторов КГАЛ продольной и модуля полной скорости судна, с постоянными времени переходных процессов измерения заданной задержки равной 20 секундам, величина которой соответствует характеристике индукционного лага «ИЭЛ-2М, и соответствующими ей коэффициентами передачи [5].

Характеристики входных сигналов, разработанные схемы и результаты моделирования процесса измерения продольной и модуля полной скорости при $C=0^\circ$ и заданной скорости $V=10$ уз приведены в работе [6].

Величина относительной средней квадратической погрешности измерения продольной скорости составила $\delta V_x \approx 1,2\%$, при этом величина дисперсии сигнала на выходе вычитающего устройства составила в установившемся режиме около $1,5 \text{ В}^2$.

Величина относительной средней квадратической погрешности измерения модуля полной скорости составила $\delta V \approx 0,9\%$, при этом величина дисперсии сигнала на выходе вычитающего устройства составила в установившемся режиме около $0,003 \text{ В}^2$. Полученные результаты с достаточной степенью точности совпадают с результатами вычисления погрешностей по формулам, полученным в работе [2].

Один из вариантов построения схемы коррелятора для измерения скорости взаимно корреляционным способом с включением только фильтров низкой частоты (интеграторов) на входах вычитающего устройства рассматривается в работе [7]. Однако каких-либо подробностей по устойчивости работы такой схемы и точностных характеристик не приводится.

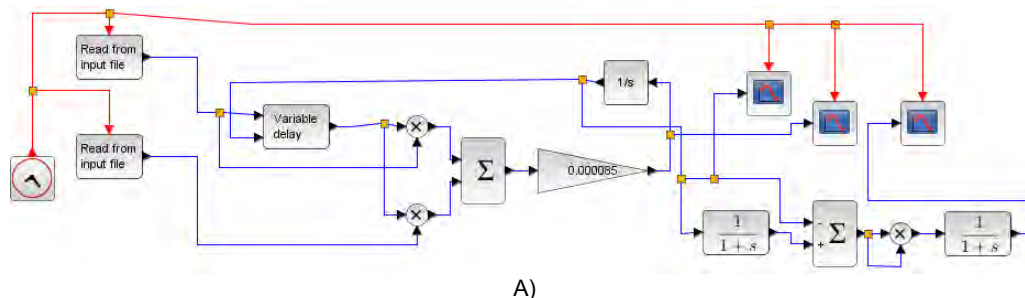
С целью дополнительных исследований были синтезированы три варианта схем корреляторов КГАЛ:

- а) варианты рисунков 1 и 3, т.е. вычитающее устройство – усилитель – интегратор;
- б) вычитающее устройство – ФНЧ с малой постоянной времени – интегратор;
- в) ФНЧ с малой постоянной времени на входе вычитающего устройства – вычитающее устройство – интегратор.

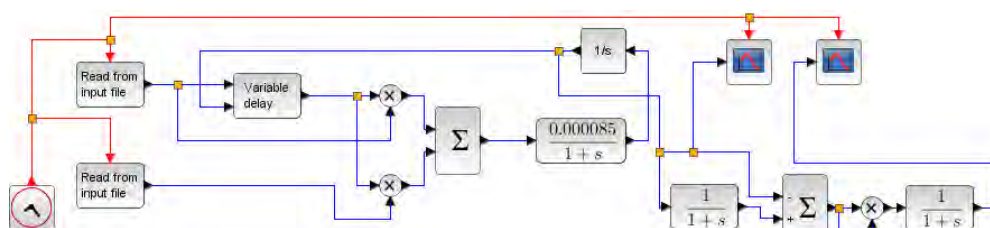
Для сохранения динамических характеристик КГАЛ (постоянной времени осреднения) коэффициенты передачи от перемножителей до выхода интеграторов во всех вариантах должны быть неизменными.

Варианты схем показаны на рисунках 7 (А-В).

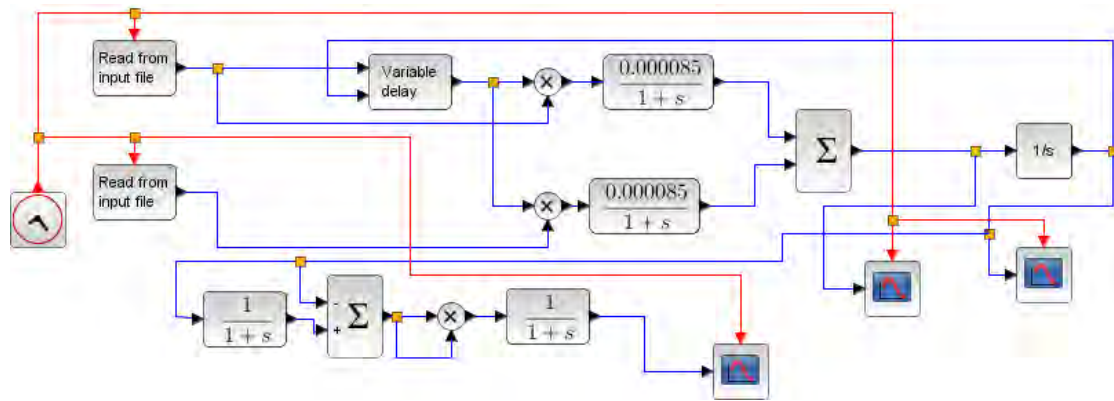
Вид входных и задержанных сигналов (выход блоков БРЗ) показан на рисунке 8. Сигнал $Y(t + \tau_{\text{ЭК}})$ и сигнал $X(t + \tau_2)$ сдвинуты по уровню на $\pm 5 \text{ В}$ для удобства восприятия.



А)



Б)



В)

Рис. 7. Варианты схем корреляторов лага продольной скорости с измерителями дисперсий сигналов

Для оценки флюктуационных погрешностей измеренных временных задержек пропорциональных скорости судна в схемы вычислительных устройств включены измерители дисперсий сигналов [8].

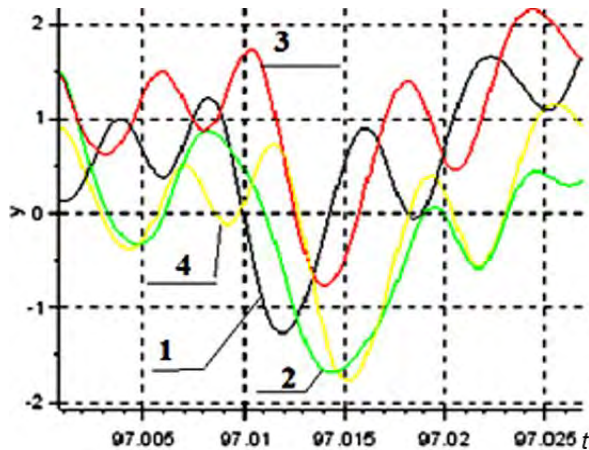


Рис. 8. Фрагменты сигналов корреляторов. Условные обозначения: чёрный (1) – сигнал 1-го приёмника; зелёный (2) – сигнал 2-го приёмника; красный (+ 5 В); (3) – сигнал с выхода БРЗ (ВАКК), задержка которого равна $\tau_2 = 0,001763$ с; жёлтый (- 5В) (4) – сигнал с выхода БРЗ (ВАКМ), задержка которого равна $\tau_1 = 0,003526$ с

На рисунке 9 изображены графики переходных процессов измерения заданных задержек сигналов (продольной скорости судна: $\tau_2 = 0,001763$ с, $T \approx 19,6$ с.) схем А и В.

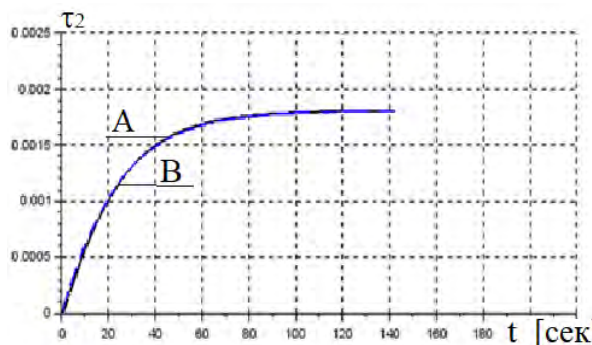


Рис. 9. Графики переходных процессов измерения задержек, соответствующих величинам: продольной скорости схем А и В

Величина амплитуд сигналов на входах интеграторов (фрагменты графиков в установленном режиме слежения для схем А, Б и В показаны на рисунке 10) подтверждает сделанные предпосылки по эффективности предварительной фильтрации сигналов на входе схемы слежения.

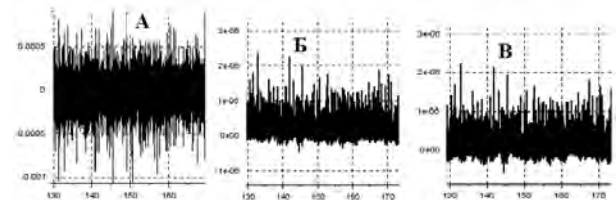
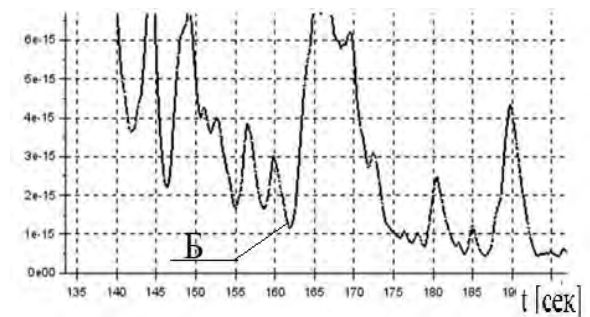
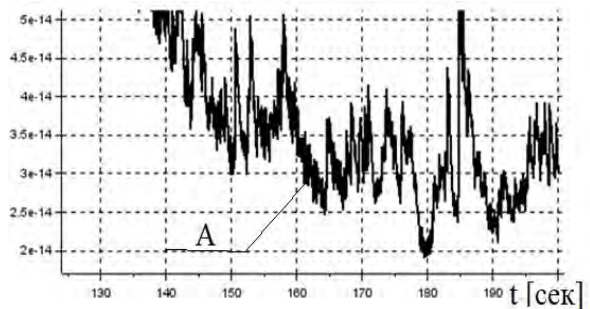


Рис. 10. Фрагменты графиков сигналов на входах интеграторов корреляторов измерения продольной скорости для схем А, Б и В

Фрагменты графиков дисперсий сигналов задержек измерения продольной скорости схем А, Б и В представлены на рисунке 11.



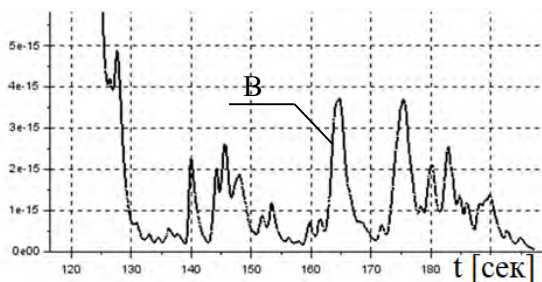


Рис. 11. Фрагменты графиков дисперсий сигналов задержек измерения продольной скорости схем А, Б и В

При максимальной величине дисперсии сигнала задержки продольной скорости схемы А равной примерно $D\tau_2 \approx 4,0 \cdot 10^{-14} \text{ с}^2$ (рис.11-А) относительная средняя квадратическая погрешность измерения продольной скорости составит $\delta V_x \approx 0,011\%$.

При максимальной величине дисперсии сигнала задержки схемы Б $D\tau_2 \approx 4,0 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2$ (рис.11-Б) относительная средняя квадратическая погрешность

измерения продольной скорости составит $\delta V_x \approx 0,0036\%$.

При максимальной величине дисперсии сигнала задержки схемы В $D\tau_2 \approx 3,0 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2$ (рис.11-В) относительная средняя квадратическая погрешность измерения продольной скорости составит $\delta V_x \approx 0,0031\%$.

Заключение

Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода повышения точности измерения продольной скорости на основе предварительной фильтрации сигналов на входе вычитающих устройств корреляторов с последующим интегрированием их разности, с уменьшением величин флюктуационных погрешностей (средних квадратических) измерения продольной скорости до 3 раз при плавании без угла сноса

Литература

1. Боркус, М. К. Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов [Текст] / М. К. Боркус, А. Е. Черный. – М. : Советское радио, 1973. – 168 с.
2. Завьялов, В. В. Измерители скорости с линейной базой направленных приемников [Текст] / В. В. Завьялов. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2004. – 176 с.
3. Абсолютные и относительные лаги [Текст] / К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарёв, Б. А. Осюхин, А. А. Хребтов: Справочник. – Л. : Судостроение, 1990. – 264 с.
4. Студеникин, А. И. Устройство и эксплуатация корреляционных лагов фирмы "Consilium Marine" [Текст] / А. И. Студеникин, В. А. Слюсарев // Морской транспорт. Экспресс-информация. Сер. Судовождение, связь и безопасность мореплавания / В/О «Мортехинформ-реклама». – 2000. – Вып. 7(374). – С. 1–23.
5. Справочник по радиоэлектронике в трех томах / Под общ. Ред. А. А. Куликовского. Т. 3. М.: Энергия. 1970. – С. 37. – 816 с.
6. Завьялов, В.В. Обоснование основных характеристик приемоизлучающего тракта корреляционного лага / В.В. Завьялов, В.А. Агапов., А.Р. Мансуров // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал № 4 (42), т. 5, 2018. – С.-Пб.: Научно-исследовательский центр «Морские интеллектуальные технологии», С. 162-168.
7. Козубовский, С. Ф. Корреляционные экстремальные системы: Справочник. [Текст] / С. Ф. Козубовский. Киев : Наукова думка, 1973. – 224 с.
8. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; Под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 480 с.

References

1. Borkus, M. K., Chernyi A. E. (1973) Korrelyatsionnye izmeriteli putevoi skorosti i ugla snosa letatel'nykh apparatov [Correlation meters of ground speed and angle of drift of aircraft]. M. Sovetskoe radio. 168 s.
2. Zav'yalov, V. V. (2004) Izmeriteli skorosti s lineinoi bazoi napravlennykh priemnikov [Speed meters with a linear base of directional receivers]. Vladivostok Mor. gos. un-t, 176 s.
3. Absolyutnye i otnositel'nye lagi [Absolute and relative lags]. (1990) K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev, B. A. Osyukhin, A. A. Khrebtov: Spravochnik. L. Sudostroenie. 264 s.
4. Studenikin, A. I., Slyusarev V. A. (2000) Ustroistvo i ekspluatatsiya korrelyatsionnykh lagov firmy "Consilium Marine" [The device and operation of the correlation lags of the company "Consilium Marine"]. Morskoi transport. Ekspress-informatsiya. Ser. Sudovozhdenie, svyaz' i bezopasnost' moreplavaniya. V/O «Mortekhinformreklama». Vyp. 7(374). S. 1–23.
5. Spravochnik po radioelektronike v trekh tomakh [Handbook of Electronics in Three Volumes]. (1970) Pod obshch. Red. A. A. Kulikovskogo. T. 3. M. Energiya. 816 s.
6. Zav'yalov, V.V., Agapov V.A., Mansurov, A.R. (2018) Obosnovanie osnovnykh kharakteristik priemoizluchayushchego trakta korrelyatsionnogo laga [Justification of the main characteristics of receiver-transmitter tract correlation lag]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. Nauchnyi zhurnal № 4 (42), T. 5. S.Pb. Nauchno-issledovatel'skii tsestr «Morskie intellektual'nye tekhnologii», pp. 162-168.
7. Kozubovskii, S. F. (1973) Korrelyatsionnye ekstremal'nye sistemy: Spravochnik [Correlation Extreme Systems: A Handbook.]. Kiev. Naukova dumka. 224 s.
8. Osnovy metrologii i elektricheskie izmereniya: Uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements: Textbook for universities]. B. Ya. Avdeev, E. M. Antonyuk, E. M. Dushin i dr. Pod red. E. M. Dushina. 6-e izd., pererab. i dop. L: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1987. 480 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Завьялов Виктор Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технических средств судовождения, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а, e-mail: zavyalov@msun.ru

Виктор Александрович Агапов, адъюнкт кафедры технических средств кораблевождения, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: victoragapov@mail.ru

Viktor V. Zavyalov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of department of technical Aids of navigation, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi 50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia, e-mail: zavyalov@msun.ru

Viktor A. Agapov, post-graduate student of department of technical aids of navigation, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia, e-mail: victoragapov@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.063
УДК 629.124.74

Идентификация источника сигнала в измерительном узле системы морского экологического и гидроакустического мониторинга

П.А. Стародубцев¹, Е.А. Сторожок¹

¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. Вероятность ложной тревоги в измерительном узле системы морского экологического и гидроакустического мониторинга может быть снижена, если проводить первичную идентификацию источника сигнала. С этой целью необходимо предусмотреть наличие в составе узла базы данных шумовых портретов целей. Сигналы с выхода предварительного усилителя измерительного узла сравниваются с сигналами, хранящимися в базе данных, путём вычисления среднеквадратического отклонения. Определяется сигнал с минимальным отклонением и соответствующий ему источник. Сравнение сигналов может быть произведено и путём вычисления корреляционной функции.

В данной статье приводятся результаты компьютерного моделирования блока первичной классификации измерительного узла в системе MATLAB&SIMULINK. Сравнимые сигналы представлены во временной области. Вероятность правильной идентификации может быть увеличена, если проводить сравнение спектров сигналов.

Ключевые слова: измерительный узел, детерминированный сигнал, период нижней гармоники, вектор отсчётов сигнала; среднеквадратическое отклонение, аддитивная помеха

Identification of the signal source in the measuring node of the sea ecological and hydroacoustic monitoring system

Pavel A. Starodubtsev¹, Evgeniy A. Storozhok¹

¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. The probability of a false alarm in the measuring unit of the marine environmental and hydroacoustic monitoring system can be reduced if the primary identification of the signal source is carried out. For this purpose, it is necessary to provide for the presence of noise portraits of targets in the database node. The signals from the pre-amplifier output of the measuring unit are compared with the signals stored in the database by calculating the standard deviation. The signal with the minimum deviation and its corresponding source are determined. Comparison of signals can be made by calculating the correlation function. This article presents the results of computer simulation of the primary classification unit of the measuring unit in the MATLAB&SIMULINK system. The compared signals are represented in the time domain. The probability of correct identification can be increased by comparing the signal spectra.

Key words: measuring unit, deterministic signal, period of the lower harmonic, signal sample vector; standard deviation, additive interference

Введение

Для снижения вероятности ложной тревоги в измерительном узле системы морского экологического и гидроакустического мониторинга [1] необходимо проводить первичную идентификацию источника сигнала. С этой целью необходимо предусмотреть наличие в составе узла базы данных шумовых портретов целей. В данной статье приводятся результаты компьютерного моделирования блока первичной классификации измерительного узла в системе MATLAB&SIMULINK.

Формирование векторов отсчётов времени и детерминированных сигналов

В соответствии с табл. 1 формируются векторы отсчётов времени и детерминированных сигналов. При этом детерминированными сигналами при проведении эксперимента считались сигналы, значения которых в любой точке интервала их определения рассчитывались заранее по определенной математической модели.

Математической моделью детерминированного сигнала являлась детерминированная функция, которая позволяла для любого заданного момента времени однозначно определять значение сигнала. Строго говоря, детерминированные

сигналы в чистом виде в природе существовать не могут. Такие сигналы могли бы возникнуть только в изолированных системах. Любая же система находится в некоторой среде, и эта среда влияет на процессы, происходящие в системе.

Таблица 1

№	Детерминированные сигналы
0	$5 \cdot \cos(2\pi \cdot 10 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 38 \cdot t) \cdot 0.2 \cdot \cos(2\pi \cdot 59 \cdot t)$
1	$\sin(2\pi \cdot 5 \cdot t)$
2	$\cos(2\pi \cdot 3 \cdot t)$
3	$\sin(2\pi \cdot 2 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 20 \cdot t)$
4	$\sin(2\pi \cdot 4 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 40 \cdot t)$
5	$\cos(2\pi \cdot 6 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 30 \cdot t)$
6	$\cos(2\pi \cdot 7 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 28 \cdot t)$
7	$\sin(2\pi \cdot 5 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 15 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t)$
8	$\sin(2\pi \cdot 4 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 24 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 40 \cdot t)$
9	$\cos(2\pi \cdot 3 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 21 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 63 \cdot t)$

Результат моделирования работы блока первичной классификации приведён в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

Yinoiseb	Yjnoise									
	Y0noise	Y1noise	Y2noise	Y3noise	Y4noise	Y5noise	Y6noise	Y7noise	Y8noise	Y9noise
Y0noiseb	-2.718	112.9	88.22	22.82	60.00	52.43	48.77	0.91	12.48	-6.33
Y1noiseb	-6.4	-0.19	-29.52	-96.36	-56.45	-60.04	-61.35	-124.68	-109.4	-120.3
Y2noiseb	-84.72	36.55	8.23	-61.70	-23.08	-42.38	-40.99	-81.69	-71.57	-102.1
Y3noiseb	-27.41	93.18	63.31	-3.21	42.28	28.76	19.57	-20.71	-13.42	-31.34
Y4noiseb	-57.67	64.82	32.28	-41.03	7.10	-7.65	-11.4	-60.52	-52.85	-64.71
Y5noiseb	-56.31	54.39	43.80	-31.37	7.59	-5.41	-5.27	-53.51	-49.78	-57.78
Y6noiseb	-47.61	58.98	47.73	-21.54	12.90	3.74	0.93	-49.64	-40.27	-55.17
Y7noiseb	-7.761	117.8	82.95	12.36	60.42	44.10	44.11	-9.22	1.63	-14.88
Y8noiseb	-10.54	110.3	77.06	15.08	63.07	50.92	43.97	-6.41	4.92	-15.88
Y9noiseb	5.44	116.8	105.57	27.33	65.33	54.65	56.09	6.78	16.05	-0.658

Зашумление сигнала

Аналогично получаем векторы отсчётов всех сигналов из табл. 1. Весь массив векторов отсчётов Yinoiseb является содержимым базы данных шумовых портретов целей, сформированные для конкретных физических явлений и объектов. Затем

вычисляются векторы отсчётов зашумлённых сигналов из табл. 1 повторно и формируется массив Yjnoise. Каждый вектор из массива Yjnoise сравнивается в Simulink с каждым вектором из массива Yinoiseb путём вычисления среднеквадратического отклонения (рис. 1).

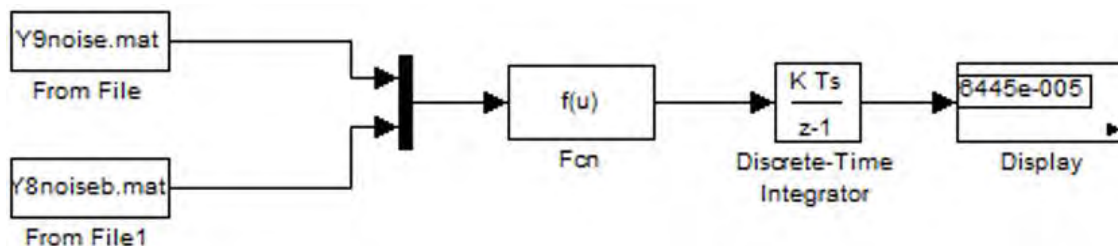


Рис. 1. Сравнение векторов отсчётов зашумленных сигналов в Simulink

Заключение

Анализ данных табл. 2 показывает, что идентификация источника сигнала в узле измерительной системы морского экологического и гидроакустического мониторинга возможна.

Из десяти проведенных опытов два дали не верный результат. Это означает, что вероятность ошибки идентификации источника сигнала равна 20

%. Очевидно, что увеличение амплитуды шумовых портретов целей и помехи будет увеличивать вероятность ошибки идентификация источника сигнала в узле измерительной системы морского экологического и гидроакустического мониторинга. В ходе моделирования производилось сравнение сигналов, представленных во временной области, если сравнивать спектры сигналов, то достоверность идентификации будет выше.

Литература

1. Сторожок Е.А. Подводная беспроводная локальная вычислительная сеть как элемент системы морского экологического мониторинга // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2016. – №8. – С. 30–34.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: «Питер», 2002. – 606 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 592 с.
4. Стародубцев П.А., Сторожок Е.А. Подключение измерительного узла системы морского экологического мониторинга к локальной вычислительной сети // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2019. – № 4. – С. 15–20.
5. Стародубцев П.А., Сторожок Е.А. Программно-аппаратная реализация цифрового фильтра нижних частот на основе микроконтроллера dspic // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2019. – № 8. – С. 10–13.

References

1. Storozhok E.A. Podvodnaya besprovodnaya lokalnaya vyhislitel'nay set kak element morskogo ekologicheskogo monitoringa. Avtomatizatsiya, telemehanizatsiya i svyaz v neftnoy promishlennosti. [Underwater wireless local area network as part of a marine environmental monitoring system]. M.: OAO «VNIIOENG», 2016. 30–34.
2. Sergienko A.B. Zifrovay obrabotka signalov. [Digital signal processing]. SPB.: «Piter», 2002. 606 s.
3. Dykonov V.P. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Obrabotka signalov i izobrazhenii. [MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Signal and Image Processing]. M.: SOLON-Press, 2004. 592 s.
4. Starodubtsev P.A., Storozhok E.A. Podkluchenie izmeritelnogo uzla sistemy morskogo ekologicheskogo monitoringa k lokalnoi vyhislitel'noy seti. Avtomatizatsiya, telemehanizatsiya i svyaz v neftnoy promishlennosti [Connecting monitoring to local computational network]. Avtomatizatsiya, telemehanizatsiya i svyaz v neftnoy promishlennosti [Connecting

the measuring node of the marine environmental monitoring system to a local computer network]. M.: OAO «VNIIOENG», 2019. 4. 15–20.

5. Starodubtsev P. A., Storozhok E. A. Programno-apparatnaya realizatsiya cifrovogo filtra nignix chastot na osnove mikrokontrollera dspic. Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftnoy promishlennosti [Hardware and Software implementation of a digital low-pass filter based on the microcontroller dspic]. – M.: OAO «VNIIOENG», 2019. 8. 10–13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павел Анатольевич Стародубцев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и общетехнических дисциплин, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: spa1958@mail.ru

Евгений Анатольевич Сторожок, кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры информационных технологий, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: storea@mail.ru

Pavel A. Starodubtsev, Professor, Dr. Sci. (Eng)., Director of department of physics and general technical disciplines, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: spa1958@mail.ru

Evgeniy A. Storozhok, Associate professor, Ph.D. (Eng)., Lecturer of Department of information technology, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: storea@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.064

УДК 623.983

Результаты экспериментальных исследований по обнаружению пловцов при развитой структуре интерференционного гидроакустического поля в прибрежной акватории берегового клина

Р.В. Викторов¹, А.О. Липовецкий¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. В статье показано, что прилегающая к особо важным объектам акватория берегового клина, остается не освещенной, и при подсветке высокочастотным сигналом, в ней формируется интерференционное гидроакустическое поле, в котором можно регистрировать движущихся пловцов. Рассматривается механизм возникновения амплитудной модуляции при отражении гидроакустического сигнала от взволнованной морской поверхности. Приведены результаты компьютерного моделирования, а также лабораторных исследований, показывающие принципиальную возможность выделения на приемном устройстве амплитудных флуктуаций, вызванных движением подводного объекта в созданном интерференционном поле. Представлена модель адаптивного компенсатора помех, а также приведены результаты натуральных экспериментальных исследований, которые показывают, что предлагаемый компенсатор позволяет подавить помеху, вызванную отражением высокочастотного сигнала от взволнованной поверхности на приемном устройстве и выделить амплитудные флуктуации, вызванные движением пловца. Показана эффективность снижения среднеквадратической ошибки помехи на измерительном приемном устройстве после адаптивного компенсатора, а также предложена схема обнаружителя движущегося подводного объекта.

Ключевые слова: адаптивный фильтр, обнаружитель, зона Френеля, обработка гидроакустического сигнала, подводный пловец, интерференция

Results of experimental studies on detection of swimmers with a developed structure of the interference hydroacoustic field in the coastal waters of the coastal wedge

Ruslan V. Viktorov¹, Andrey O. Lipovetskiy¹¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Russian Federation

Abstract. The article shows that the water area of the coastal wedge adjacent to particularly important objects remains unlit, and when illuminated by a high-frequency signal, an interference hydroacoustic field is formed in it, in which moving swimmers can be registered. The mechanism of occurrence of amplitude modulation at reflection of a hydroacoustic signal from the agitated sea surface is considered. The results of computer simulation and laboratory studies are presented, showing the principal possibility of isolation on the receiving device amplitude fluctuations caused by the movement of an underwater object in the created interference field. The model of adaptive interference canceller and the results of field experimental studies, which show that the proposed compensator can suppress interference caused by reflection of high-frequency signal from the rough surface on the receiving device and to allocate the amplitude fluctuations caused by the movement of the swimmer. The efficiency of reducing the RMS error of interference on the measuring receiver after the adaptive compensator is shown, and the scheme of the detector of a moving underwater object is proposed.

Key words: adaptive filter, detector, Frenel zone, sonar signal processing, underwater swimmer, interference

Введение

Современная концепция ведения войны в последние годы привела к интенсивному применению сил специальных операций.

Задача защиты транспортов, инфраструктуры со стороны моря от подводных диверсантов в настоящее время приобретает все более острый характер. К охраняемым объектам, таким как морские базы, порты, атомные электростанции, морские инженерные коммуникации пловцы доставляются с помощью средств доставки.

Большинство экстремистских организаций приняли на вооружение методы подготовки и тактику действий подводно-диверсионных сил и средств (ПДСС) развитых стран.

На подходах к охраняемым объектам задачи обнаружения ПДСС решаются с использованием активных гидроакустических средств. Обнаружение пловцов в непосредственной прибрежной акватории

активными средствами затруднено из-за повышенной реверберационной помехи.

При этом, как показывают расчеты, в условиях прибрежных акваторий, происходит резкий спад энергии прямого и отраженного от объекта зондирующего сигнала. Требуется индивидуальный подход и предварительное обследование каждого района, где размещать средства освещения подводной среды.

Пловцы при движении на ластах не обладают первичным гидроакустическим полем, а также отсутствием в их спектре шумоизлучения ДС, что позволяет им беспрепятственно проникать через охранные системы подводного наблюдения, форсируя охраняемую акваторию вблизи берегового шельфа с глубинами, не превышающими несколько метров. В результате проблема своевременного обнаружения движущихся малозумных подводных объектов (МПО) в мелководной акватории берегового клина остается на сегодняшний день не

решенной.

В работе [1], показано, что при создании охранных систем используют технические средства, работающие на принципе обнаружения движущегося объекта по нарушению сформировавшейся интерференционной картины, созданной путем излучения электромагнитных или акустических волн в охраняемых пространствах, имеющих неподвижные границы.

Проведенные экспериментальные исследования, показал, что реализация такого охранного устройства в морских условиях возможна с внедрением адаптивной фильтрации сигналов [2-4] в схему обработки посредством применения адаптивных фильтров, например, реализующих метод наименьших квадратов (МНК) таким образом, чтобы их выходной сигнал соответствовал

неизвестному сигналу по критерию наилучшего среднеквадратического приближения [5].

1. Моделирование возможности регистрации подводных объектов в условиях мелководного клина

С использованием программы расчета передаточных функций морской среды на основе метода псевдодифференциальных параболических уравнений проведенные исследования акустического поля излучателя на частоте 20 кГц в условиях прибрежной акватории берегового клина до дистанции 250 м показали, что возможно зарегистрировать изменения интерференционной картины движущимся подводным объектом.

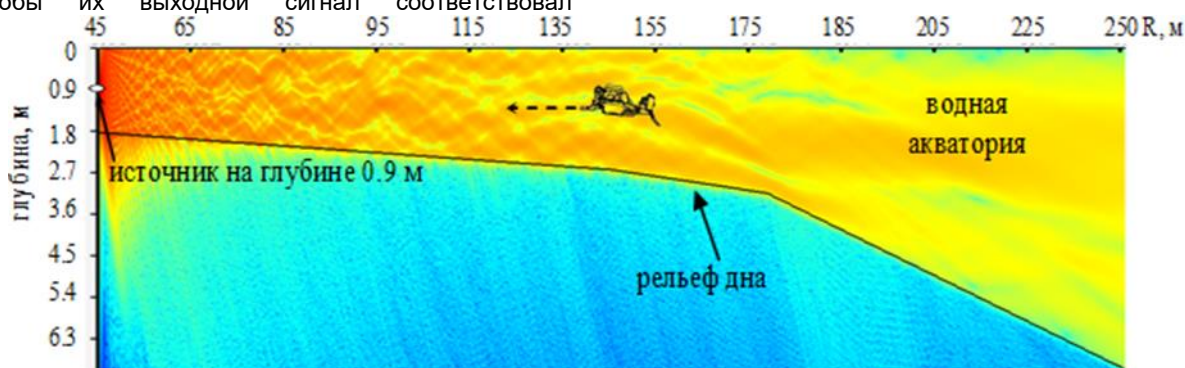


Рис. 1. Расчет акустического поля для мелководного района до дистанции 250м (источник точечный, дистанция от берега 80 м, $f=20$ кГц)

Анализ акустического поля точечного источника звука, представленного на рис. 1, показал, что в ровной шельфовой зоне интерференционная структура проявляется как устойчивое регулярное распределение энергии акустического поля. На рис. 2 представлены горизонтальные разрезы спада интенсивности звуковой энергии с расстоянием при компьютерном моделировании перемещения

подводного объекта в озвученной области. Анализ рис. 2 показывает, что интенсивность акустического поля при расположении приемного гидрофона на расстоянии 80 м от берега или 35 м от излучателя тонального сигнала (см. рис. 1) может измениться на 20 дБ, при перемещении объекта в водной среде на 10 м.

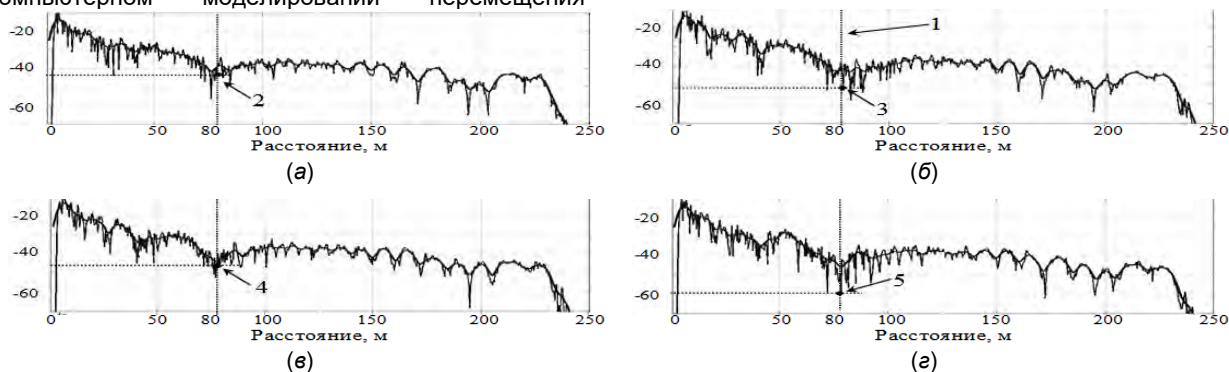


Рис. 2. Распределение интенсивности сигнала с расстоянием от ненаправленного источника звука на частоте 20 кГц а) объект отсутствует; объект на расстоянии от приемного гидрофона (линия 1): б) - 60 м; в) - 55 м; г) - 50 м

Результаты моделирования показали, что возможна регистрация движущегося подводного объекта по изменению амплитудных флуктуаций, принимаемого тонального сигнала в определенной точке пространства, в условиях берегового клина.

2. Модель амплитудной модуляции при отражении сигнала от взволнованной поверхности моря

В реальном волноводе при излучении

высокочастотного сигнала (ВЧС) будет формироваться акустическое поле в результате отражения от взволнованной поверхности и дна.

Качественный характер отражения и рассеяния звука на поверхности моря, как известно, зависит от степени волнения, которое определяется параметром Релея. Отраженный сигнал включает когерентную и рассеянную составляющую и флуктуирует по амплитуде и фазе.

В результате многократных переотражений от дна и поверхности, в слое возникает сложная интерференционная картина.

Звуковое давление в каждой точке акустического поля морской среды, можно рассматривать как суперпозицию прямого и отраженных от границ ВЧС и рассчитать с использованием мнимых источников, образованных за счет отражения от поверхности морской среды. Когерентные волны суммируются и в прибрежной акватории берегового клина образуется интерференционное акустическое поле, определяемое выражением:

$$p(r) = p_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{R_i(\text{Re}l, \theta) \cdot e^{jkr_i}}{r_i}, \quad (1)$$

где p_0 – звуковое давление, создаваемое источником звука на единичном расстоянии; $R_i(\text{Re}l, \theta)$ – коэффициент отражения от границ морской среды для i -го мнимого источника, определяемый выражением $m_{\text{коз}} = |m_0| \cdot e^{-(\text{Re}l)}$.

Здесь m_0 – коэффициент отражения от плоской поверхности океана; $\text{Re}l$ – параметр Рэлея; θ – угол скольжения падающей на поверхность моря акустической волны; k – волновое число излученного сигнала; r_i – расстояние от источника звука до точки поля для i -го мнимого источника.

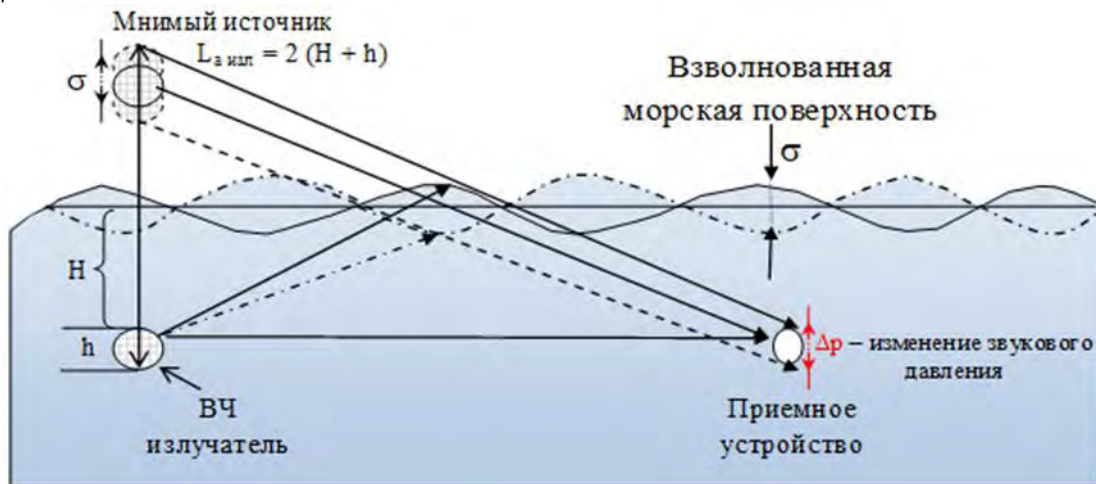


Рис. 3. Физическая модель возникновения амплитудной модуляции при отражении ВЧС от взволнованной морской поверхности

3. Экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне

Проведенные лабораторные исследования в гидроакустическом бассейне подтвердили возможность выявления изменений интерференционного поля, созданного в замкнутом объеме на фоне спокойной воды, при перемещении в нем движущейся моделию.

На рис. 4, а, б представлены результаты экспериментальных исследований при протяжке модели в бассейне на фоне волнения, где видно, что

Из выражения (1) видно, что формирование интерференционного акустического поля в морской среде зависит от параметра Рэлея, который определяется ВЧС.

Зона Френеля (интерференционная зона) излучателя будет определяться глубиной его погружения, местоположением мнимого источника звука и размерами виртуального излучателя.

На схеме (рис. 3) показана физическая модель возникновения амплитудной модуляции при отражении ВЧС от взволнованной морской поверхности, где показано, что волнение водной поверхности приводит к флуктуациям размеров виртуального излучателя $L_{\text{визл}}$ на величину σ .

Это будет приводить к флуктуациям распределения звукового давления Δp с расстоянием в зоне Френеля, форма которой зависит от размеров излучателя. В точке расположения приемного устройства (ПУ) будут появляться амплитудные флуктуации сигнала, вызванные амплитудной модуляцией излученного тонального ВЧС.

То есть взволнованная поверхность воды будет оказывать мешающее воздействие на ПУ и при появлении в области действия ПУ подводного объекта, вызывающего дополнительные флуктуации своим движением, будет невозможно.

выделить амплитудные флуктуации, вызванные движущейся моделью в интерференционном поле, в точках расположения гидрофонов невозможно.

Однако использование АФ позволяет отстроиться от помех, вызванных амплитудной модуляцией переотраженного от взволнованной поверхности сигнала, и выделить амплитудные флуктуации сигнала, вызванные движущимся объектом в интерференционном поле, как показано на рис. 4, в.

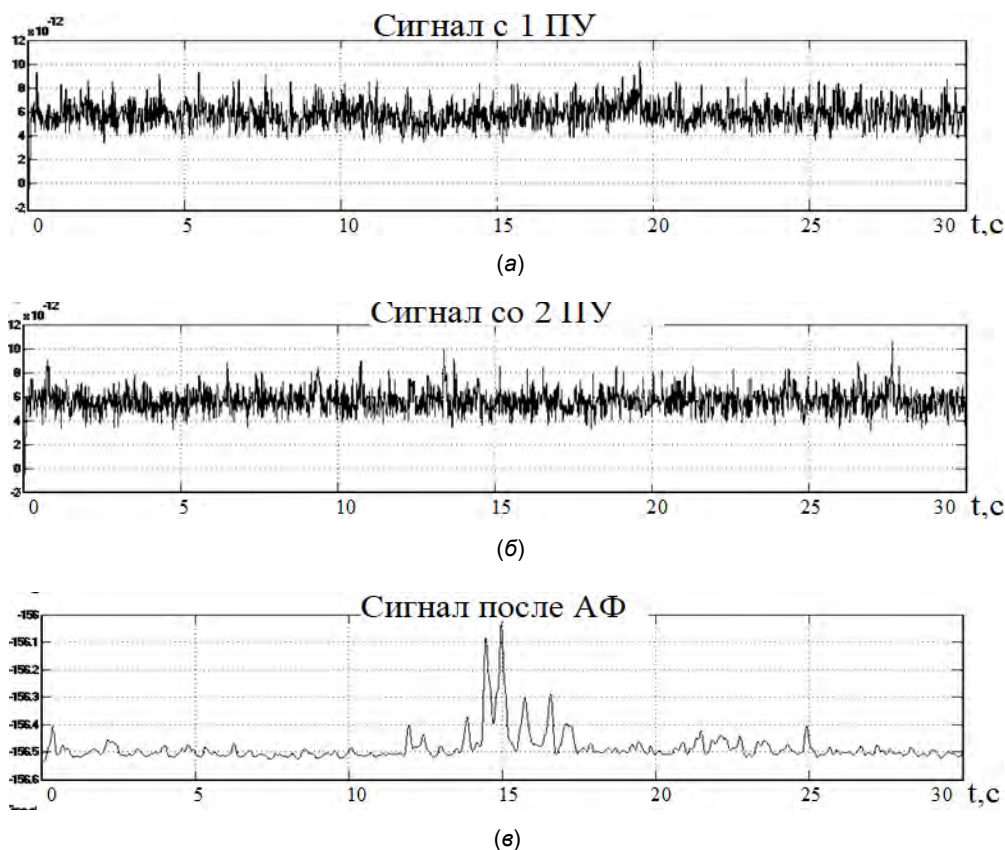


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований при протяжке модели в бассейне на фоне волнения: а - сигнал с 1 ПУ; б - сигнал со 2 ПУ; в - сигнал после обработки с использованием АФ

Таким образом, модель адаптивного компенсатора помех при регистрации изменения интерференционной картины акустического поля движущимся пловцом можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 5.

Излученный и отраженный от поверхности моря и дна многочастотный сигнал в охраняемой акватории принимается ПУ1 и ПУ2. После дискретизации сигналы $d(k)$ и $x(k)$ поступают на блоки полосовых фильтров (ПФ) где происходит их расфилترовка по частотам излучаемого сигнала.

С помощью блока подключения ПФ и блока

оценки нормированной функции взаимной корреляции (ФВК) через реле подключаются к входам адаптивного фильтра полосовые фильтры с сигналами $d_1(k)$ – входной сигнал АФ и $x_1(k)$ – эталонный сигнал АФ на той частоте, которой соответствует максимальный коэффициент ФВК $R_{1,2}$, в зависимости от высоты взволнованной поверхности.

В АФ вырабатывается выходной сигнал $y(k)$ который стремится приблизить входной сигнал $d_1(k)$ к опорному сигналу $x_1(k)$ вычитая из $d_1(k)$ выработанный АФ сигнал ошибки $e(k)$.

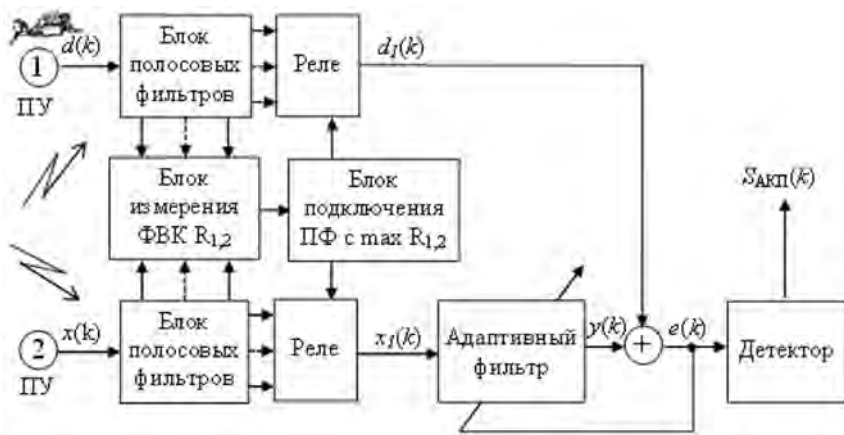


Рис. 5. Модель адаптивного компенсатора помех при регистрации изменения интерференционной картины акустического поля движущимся пловцом

В случае появления около ПУ1 движущегося пловца, на выходе детектора сформируется выходной сигнал адаптивного компенсатора помех $S_{АКП}(k)$ представляющий собой амплитудные флуктуации, вызванные движением пловца, очищенные от амплитудных флуктуации помех, вызванных взволнованной поверхностью моря.

4. Результаты натуральных экспериментальных исследований

Проведены морские экспериментальные



Рис. 6. Схема проведения морских экспериментальных исследований

На рис. 7 представлены результаты экспериментов по регистрации амплитудных флуктуаций, вызванных движением пловца в области второго ПУ в условиях малого и развитого волнения моря.

Анализ рис. 7 а, г показывает, что на фоне взволнованной поверхности моря зарегистрировать проход пловца не возможно. При малом и высоком волнении моря и частоте излучения 10 кГц использование адаптивного компенсатора помех позволяет выделить амплитудные флуктуации сигнала, вызванные движением пловца.

При этом значения параметра Релея на этой

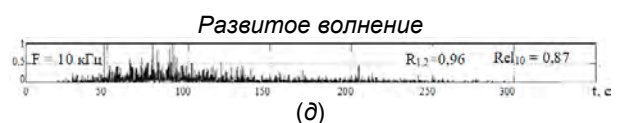
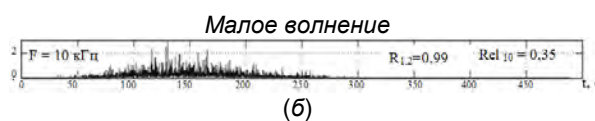
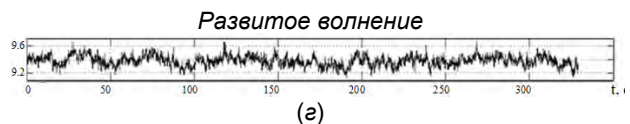
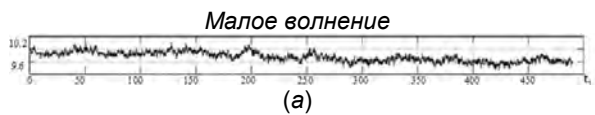
исследования в одной из бухт. На рис. 6 приведена одна из схем проведения морских экспериментальных исследований.

Обработка сигналов выполнялась с помощью разработанного программного обеспечения в программе Matlab.

Исследования проводились в летне-осеннее время года, при различных гидрометеорологических условиях, размещении выносных частей системы, а также скоростях движения подводного пловца.

частоте излучения низкие, а рассчитанные коэффициенты взаимной корреляции (КВК) $R_{1,2}$ ВЧС между ПУ близки к 1 (см. рис. 7, б, д).

Из рис. 7, в после обработки сигнала при малом волнении моря видно, что при излучении сигнала на частоте 20 кГц возможно выделить амплитудные флуктуации сигнала, вызванные движением пловца, т.к. параметр Релея на этой частоте низкий, а рассчитанный коэффициент взаимной корреляции сигнала подсветки между приемными устройствами близок к 1 (см. рис. 7, в).



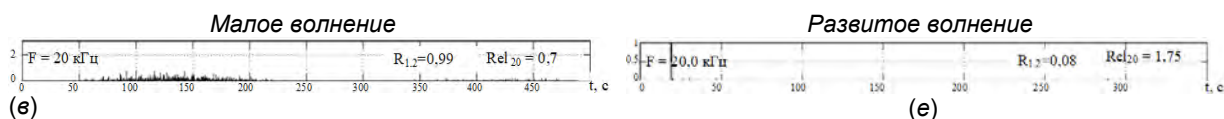


Рис. 7. Результаты морских экспериментальных исследований на частотах излучения 10 и 20 кГц с выхода второго ПУ: а, г – до обработки ВЧС; б, в, д, е – после обработки ВЧС адаптивным компенсатором помех

При низком коэффициенте корреляции сигнала между гидрофонами и высоком параметре Релея, который наблюдался на частоте 20 кГц, в условиях высокого волнения, выделить амплитудные флуктуации, вызванные движением пловца, невозможно, как показано на рис. 7, е. Расчетные дистанции обнаружения пловца по результатам экспериментов при различных условиях составили 40-60 м.

5. Обнаружитель подводного пловца

Для оценки эффективности снижения среднеквадратической ошибки помехи после

обработки её адаптивным компенсатором помех были построены гистограммы закона распределения флуктуаций амплитуды сигналов, полученных записей с ПУ №1 и ПУ №2, с использованием программы MathCAD, представленные на рис. 8.

Анализ проведенных расчетов показал, что полученные распределения флуктуаций амплитуд сигналов распределены по закону Гаусса.

Расчеты показали, что адаптивный фильтр подавил помеховую составляющую в опорном сигнале почти в 44 раза по амплитуде или 1900 раз по мощности.

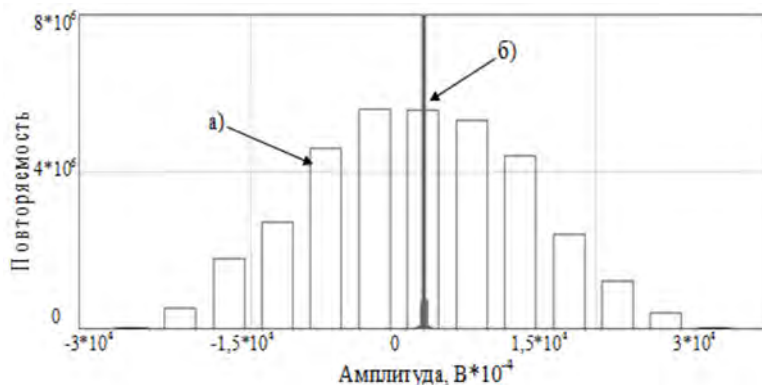


Рис. 8. Гистограммы распределения: а – опорного сигнала до адаптивного фильтра; б - сигнала ошибки с выхода адаптивного фильтра

Для автоматического обнаружения находящегося в области действия ПУ пловца была рассмотрена возможность разработки порогового устройства.

На рис. 9 представлена реализация, полученная

после схемы обработки с ПУ №1, на которой выбран участок 1, где проявляются флуктуации сигнала, обусловленные движением пловца (смесь сигнала и помехи) и участок 2, где флуктуаций нет (помеха).

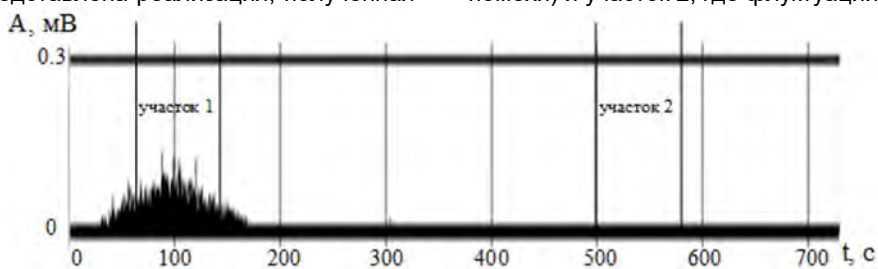


Рис. 9. Амплитудно-временная диаграмма сигнала после схемы адаптивной обработки

Из полученных участков сформированы выборки и проведена проверка соответствия плотности распределения полученной выборки с некоторой теоретической плотностью распределения по критерию Колмогорова-Смирнова, которая показала, что они распределены по закону Рэлея при заданном уровне значимости с вероятностью 95%.

Пороговый обнаружитель был реализован по

критерию Неймана-Пирсона, для чего была задана вероятность ложной тревоги $P_{лт}=10^{-7}$ и рассчитана величина порога $U_0 = \sqrt{-2 \cdot \sigma_n^2 \cdot \ln(P_{лт})}$, где σ_n - дисперсия амплитудных флуктуаций помехи.

На рис. 10 показаны гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой.

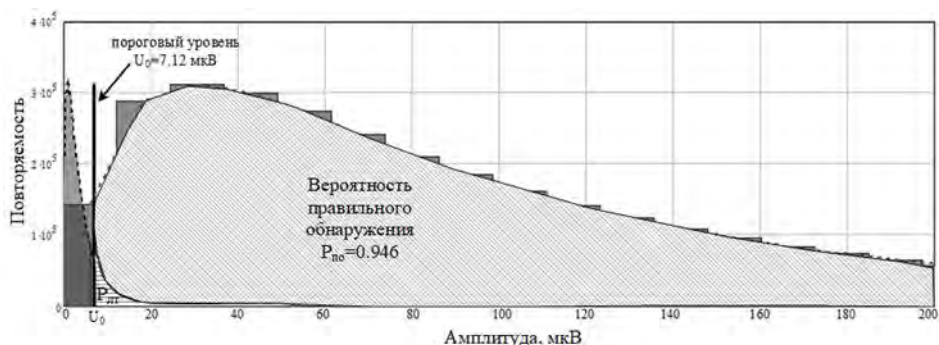


Рис. 10. Гистограммы распределения выборок амплитудных флуктуаций помехи и смеси сигнала с помехой с ПУ №1

Из рис. 10 видно, что вероятность правильного обнаружения $P_{по}$ составила 0,94 (при заданной вероятности ложной тревоги равной 10^{-7}), что говорит о высокой эффективности схемы АКП при обнаружении пловцов в условиях мелководной прибрежной акватории берегового клина.

Заключение

Таким образом, результаты морских экспериментов показали, что применение АКП позволяет создать охранную систему водного района интерференционного типа, скомпенсировать помехи,

вызванные модуляцией излученного ВЧС при отражении от взволнованной поверхности водной акватории и обнаружить пловца по изменению амплитудных флуктуаций интерференционной картины акустического поля с использованием нерекурсивного адаптивного фильтра типа LMS.

При этом выбор частоты излучения следует предварять измерениям КВК ВЧС между двумя ПУ, который зависит от параметра Релея, характеризующего степень когерентности, отраженного от морской поверхности ВЧС.

Литература

1. Патент 2124232 Российской Федерации, МПК 6G08B13/24. Устройство для тревожной сигнализации / Трефилов Н.А.; Николаенко В.А.; Шереметов Ю.Ю.; Елягин С.В.; Маргелов А.А.; Ульяновский государственный технический университет Российской Федерации. - №96102923; заявл.15.02.1996; опубл. 27.12.1998.
2. Р.В. Викторов, Колмогоров В.С. Интерференционный обнаружитель движущегося подводного объекта с использованием адаптивной фильтрации // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2011. - № 2(33). - С. 31-37.
3. Р.В. Викторов, В.С. Колмогоров, В.В. Плюхин, А.В. Омельченко, С.А. Шпак. Адаптивная обработка гидроакустического сигнала при обнаружении подводного пловца в мелководном прибрежном охраняемом районе // Технологии техносферной безопасности. Интернет журнал. – 2012. - № 2(42). Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/>.
4. Р.В. Викторов, В.С. Колмогоров, Э.В. Москаленко, С.А. Шпак. Интерференционный обнаружитель движущегося подводного объекта // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – СПб, 2014. – № 1(7). – С. 65–74.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - 2-е изд. - СПб.: Питер, 2006. - 752 с.

References

1. Patent 2124232 Rossiyskoy Federatsii, MPK 6G08B13/24. Ustroystvo dlya trevozhnoy signalizatsii [Alarm device]. / Trefilov N.A.; Nikolaenko V.A.; Sheremetov YU.YU.; Elyagin S.V.; Margelov A.A.; Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Rossiyskoy Federatsii. №96102923; zayavl.15.02.1996; opubl. 27.12.1998.
2. R.V. Viktorov, Kolmogorov V.S. Interferentsionnyy obnaruzhitel' dvizhushchegosya podvodnogo ob"ekta s ispol'zovaniem adaptivnoy fil'tratsii [Interference detector of moving underwater object using adaptive filtration]. // Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo, 2011, № 2(33). pp. 31-37.
3. R.V. Viktorov, V.S. Kolmogorov, V.V. Plyukhin, A.V. Omel'chenko, S.A. SHpak. Adaptivnaya obrabotka gidroakusticheskogo signala pri obnaruzhenii podvodnogo plovtsa v melkovodnom pribrezhnom okhranyaemom rayone [Adaptive processing of the hydroacoustic signal at detection of the underwater swimmer in shallow coast protected area]. // Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Internet zhurnal. 2012. № 2(42). Rezhim dostupa: <http://ipb.mos.ru/>.
4. R.V. Viktorov, V.S. Kolmogorov, E.V. Moskalenko, S.A. SHpak. Interferentsionnyy obnaruzhitel' dvizhushchegosya podvodnogo ob"ekta [Interference detector of a moving underwater object]. // Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika, SPb, 2014, № 1(7). pp. 65-74.
5. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov. [Digital signals processing]. 2-e izd. SPb.: Piter, 2006. 752 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Викторович Викторов, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры морского подводного вооружения, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: rusvictorov@yandex.ru

Андрей Олегович Липовецкий, адъюнкт, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова, 690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6, e-mail: rusvictorov@yandex.ru

Ruslan V. Viktorov, Ph.D. (Eng.), Professor of the department of marine underwater weapons, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation, e-mail: rusvictorov@yandex.ru

Andrey O. Lipovetskiy, Post-graduate student, Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russian Federation

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.065

УДК 623.983

Экспериментальные исследования возможности регистрации шумоизлучения морского объекта в неблагоприятных гидрологических условиях при использовании адаптивной фильтрации помех

Р.В. Викторов¹, М.В. Дягилев¹, А.В. Крупеньков¹¹Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

Аннотация. В настоящее время при всплытии подводного объекта, особенно в неблагоприятных гидрологоакустических условиях не обеспечивается его безопасность от столкновения с морскими целями. Показано, что для решения этой проблемы возможно применение в типовом тракте гидроакустической системы обнаружения использование линейного фильтра Калмана. Представлены результаты имитационного моделирования показывающие принципиальную возможность регистрации малозумных объектов в неблагоприятных условиях, при обеспечении всплытия подводного объекта. Приведены результаты морских экспериментальных исследований, которые показывают, что применение в гидроакустическом тракте обнаружения линейного фильтра Калмана позволяет подавить фоновую помеху моря, гидродинамические шумы и шумы дальнего судоходства на приемном устройстве и выделить сигналы шумоизлучения морского объекта при низких входных отношениях сигнал/помеха. Показано, что применение в тракте обработки адаптивного фильтра Калмана позволяет повысить выходное отношение сигнал/помеха, а также существенно увеличить время наблюдения за надводным объектом.

Ключевые слова: адаптивный фильтр Калмана, проходная характеристика, шумоизлучение объекта, безопасность плавания

Experimental study of the possibility check the noise marine facility in adverse hydrological conditions when using adaptive noise filtering

Ruslan V. Viktorov¹, Mikhail V. Dyagilev¹, Alexander V. Krupenkov¹¹Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

Abstract. For the ascent of the underwater object, especially in adverse conditions gidroakusticheskikh not ensured his safety from collision with the sea objectives. It is shown that to solve this problem it is possible to use a linear Kalman filter in a typical path of a hydroacoustic detection system. The results of simulation showing the principal possibility of registration of low-noise objects in adverse conditions, while ensuring the surfacing of an underwater object.

The results of marine experimental studies, which show that the use of a linear Kalman filter in the sonar detection path allows to suppress background noise of the sea, hydrodynamic noise and noise of long-distance navigation at the receiver and to highlight the noise emission signals of the marine object at low input signal/noise ratios, are presented. It is shown that the use of an adaptive Kalman filter in the processing path can increase the output signal / noise ratio, as well as significantly increase the time of observation of the surface object.

Key words: adaptive interference compensator, detector, uncorrelated interference, discrete component, noise emission, adaptive filter

Введение

Проблема обеспечения безопасности плавания подводных объектов в настоящее время носит актуальный и острый характер. Освещение ближней обстановки обеспечивает безопасность плавания подводного объекта от столкновений с морскими целями. История развития подводного плавания показывает, что эта проблема не решена до настоящего времени [1, 2]. Поэтому для обеспечения плавания ПЛ в неблагоприятных гидроакустических условиях требуется разработка новых технических решений, методов, способов регистрации и обнаружения этих морских целей. Для решения проблемы регистрации морских объектов при решении задач обеспечения безопасности и скрытности всплытия, может быть использован линейный фильтр Калмана-Бьюси в схеме типового тракта обнаружения движущихся морских объектов.

1. Имитационное моделирование возможности регистрации малозумных объектов в неблагоприятных условиях

По сравнению с другими наиболее известными алгоритмами адаптивной фильтрации линейный фильтр Калмана (ЛФК) дает возможность производить обработку сигналов в реальном масштабе времени [3]. Вычислительная ценность алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси обусловлена его рекуррентной формой, что позволяет существенно снизить нагрузки на ЭВМ, а также дает возможность получать практически реализуемую структуру оптимального фильтра.

Среди всех различных алгоритмов Калмановской фильтрации, следует выделить алгоритм фильтрации, позволяющий выделять сигнал на фоне помех [4]. Рассмотрим частный случай, когда наблюдения есть аддитивная смесь сигнала и помехи:

$$z(t) = x(t) + r(t). \quad (1)$$

Пусть L^t – линейный оператор, преобразующий наблюдения $z(t)$ в оценку $\hat{x}(t)$ $\hat{x}(t) = L^t(x(t) + r(t))$.

Роль этого оператора заключается в отделении $x(t)$ от $r(t)$. Процедура такого выделения сигнала называется фильтрацией. В некоторых случаях лучший результат можно получить, если оценивание сигнала $x(t)$ производить с запаздыванием на фиксированное время T , тогда процедура оценивания называется сглаживанием и имеет вид

$$x(t - T) = L^t z(t). \quad (2)$$

В случае прогнозирования значения сигнала $x(t)$ процедуру оценивания называют упреждением или экстраполированием, которая выражается как:

$$\hat{x}(t + T) = L^t z(t). \quad (3)$$

Исходя из вышесказанного был разработан способ выявления шумоизлучения морских объектов при решении задач обеспечения безопасности и скрытности всплытия подводного объекта в неблагоприятных гидрологических условиях при использовании фильтрации сигналов, основанной на линейном фильтре Калмана (ЛФК).

Для оценки возможности применения данного алгоритма был проведен анализ математических моделей сигнала шумоизлучения морского объекта и основных помех воздействующих на приемную систему. При работе гидроакустической системы в режиме ШП, шумоизлучение объекта рассматривается как полезный сигнал, воздействующий на приемную антенну. Спектр такого сигнала, описывается степенной функцией вида a/f^2 (где a – некоторое значение), и спадает на 6 дБ по мере увеличения октавных полос частот на логарифмической шкале.

Так спектральная плотность давления (СПД) сигнала наблюдаемой цели в точке излучения может быть описана функцией:

$$P_0(f) = \frac{25(f/f_0)^3}{1 + (f/f_0)^5}, \quad (4)$$

где f_0 – частота максимума СПД шумящего объекта.

СПД шумов, обусловленных ветровым волнением

$P_{ш.вол.}$, а также шумов судоходства различной интенсивности $P_{сд.}$ можно описать с использованием математических выражений:

$$P_{ш.вол.}(f) = \frac{K \cdot (f/f_0)^m}{1 + (f/f_0)^{2m}}, \quad (5)$$

$$P_{сд.}(f) = \frac{Q \cdot (f/f_0)^n}{1 + (f/f_0)^{2n}}, \quad (6)$$

при этом коэффициенты K, Q, m и n , выбираются из специальных таблиц, а f_0 – частота, на которой СПД достигает максимального значения.

Шум потока создается давлениями, возникающими в турбулентном потоке и действующими на лицевую поверхность гидрофона, окруженного турбулентным пограничным слоем.

Зависимость уровня гидродинамических помех от скорости хода носителя ГАС можно представить в виде:

$$p_n(V) = p_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^m, \quad (7)$$

где p_0 – давление помех при нормированной скорости V_0 ; m – показатель, зависящий от типа носителя, конструкции обтекателя, диапазона частот и интервала скоростей; V – скорость потока.

Таким образом, мы видим, что основными источниками помех работе гидроакустической системы в районе всплытия подводного объекта являются динамические шумы, обусловленные ветровым волнением, гидродинамические шумы обусловленные скоростью носителя ГАС и шумы дальнего судоходства.

На основании принятых моделей сигналов и помех был разработан алгоритм формирования сигнал/помеха с регулируемым ОСП блок-схема которого представлена на рис. 2.

По схеме, представленной на рис. 1, было проведено имитационное моделирование на предмет возможности применения фильтра Калмана при выделении полезного сигнала на фоне воздействующих помех при неблагоприятных гидрологических условиях при разных входных параметрах соотношения сигнал/помеха (ОСП).

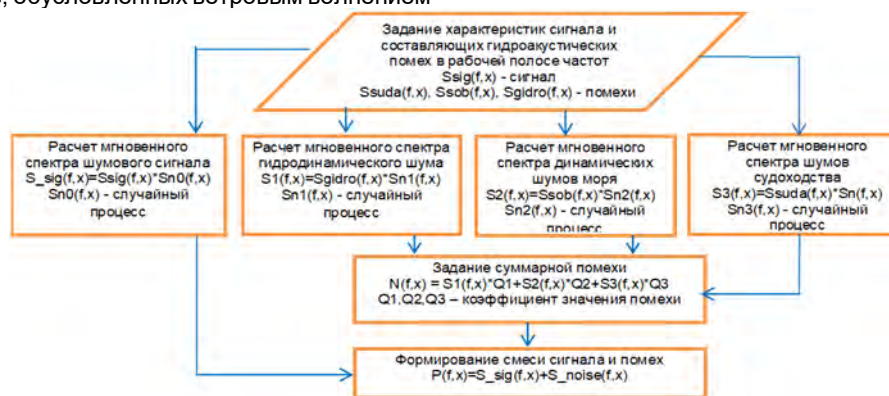


Рис. 1. Блок формирования сигнал/помеха с регулируемым ОСП

Для сравнительной оценки применения ЛФК в классической схеме типового тракта обнаружения

применялся алгоритм, представленный на рис 2, а также реализованный в работе [5].

На рис. 3. представлены спектры несущей параметров входных соотношениях сигнал/помеха (ОСП). имитационных сигналов и помех при разных (ОСП).

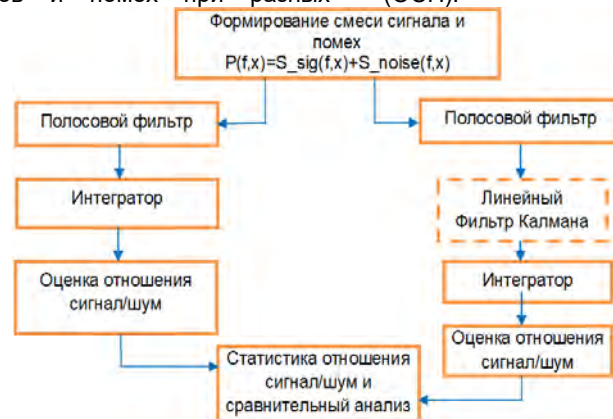


Рис. 2. Блок-схема оценки имитационного сигнала шумоизлучения морского объекта с применением классической схемы типовой тракта обнаружения и при использовании линейного фильтра Калмана

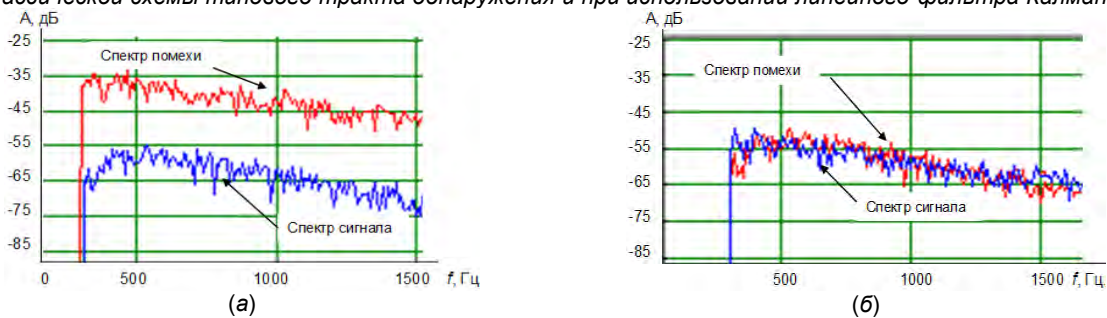


Рис. 3. Спектры несущей сигнала и помехи при разных входных ОСП а – -10 дБ; б – 0 дБ.

Имитация временных характеристик создавалась при разных условиях входного ОСП по временным отрезкам длительностью 5 сек. Сначала моделировалась аддитивная смесь помех, воздействующих на приемную систему (шум моря, гидродинамический шум и т.д.) с 0 по 5 сек и с 10 по

20 сек, с 5 по 10 сек. моделировалась аддитивная смесь сигнала шумоизлучения морского объекта, Для примера на рис. 4. представлена модель временной реализации для входного ОСП рановго -10дБ.

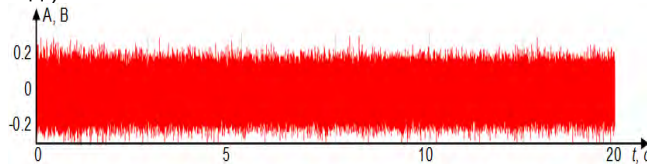


Рис. 4. Модель временной реализация при входном ОСП -10 дБ

Для примера на рис. 5, представлены характерные результаты сравнительного анализа обработки имитационных сигналов шумоизлучения

морского объекта при классической схеме обработки и с использованием разработанного алгоритма на основе линейного фильтра Калмана при входном ОСП -10 дБ и скорости движения модельного объекта 8 уз.

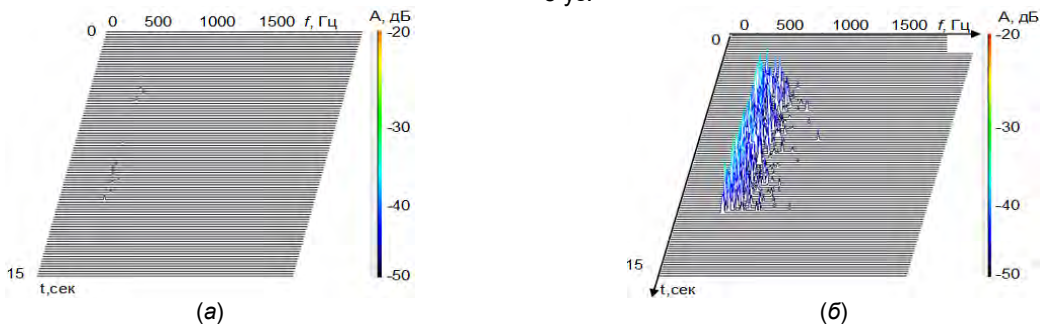
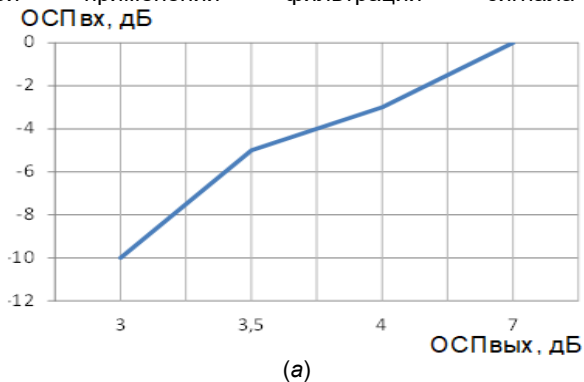


Рис. 5. Проходная характеристика цели на скорости 8 узлов при входном ОСП -10 дБ: а – без использования ЛФК; б – с применением ЛФК

Из рис. 5 видно, что выходное ОСП при выделении сигналов шумоизлучения модельного сигнала по классической схеме составило около 3 дБ (рис. 5, а) и 14 дБ с применением линейного фильтра Калмана (рис. 5, б).

Оценка результатов, полученных при проведении имитационного моделирования осуществлялась путем измерения ОСП или превышение уровня имитационного сигнала шумоизлучения морского объекта над уровнем сплошной части спектра (СЧС) при применении фильтрации сигнала



шумоизлучения, основанной на ЛФК и без нее. Так на рис. 6. представлен сравнительный анализ, полученных реализаций после классической схемы обработки и при использовании ЛФК в виде зависимостей ОСПвых от ОСПвх.

Из рис. 6 видно, что ОСПвых имитационного сигнала шумоизлучения морского объекта при применении линейного фильтра Калмана выше на 11 - 17 дБ, чем ОСПвых без применения ЛФК при различных входных ОСПвх.

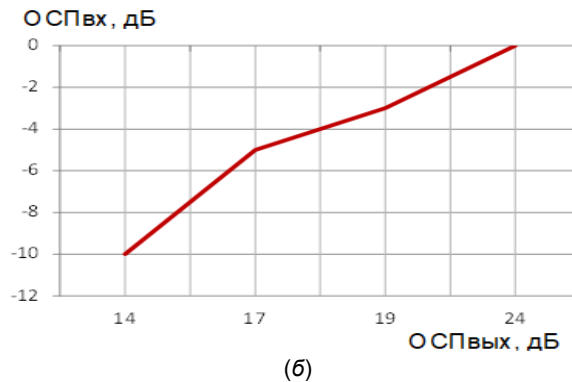


Рис. 6. График зависимости выходного ОСП от входного а – до применения ЛФК б – после обработки с использованием ЛФК

Таким образом, модельные экспериментальные исследования показали, что применение ЛФК при спектральном анализе сигналов шумоизлучения морских объектов, позволяют повысить выходное ОСП от 11 до 17 дБ при входных ОСП до – 10 дБ.

2. Натурные экспериментальные исследования возможности регистрации малошумных объектов в неблагоприятных условиях

Разработанный программно - алгоритмический комплекс обеспечения показал высокую эффективность его использования при работе с моделями сигналов шумоизлучения морских объектов и помех.

С целью проверки разработанного способа были проведены натурные экспериментальные исследования с надводным объектом, с целью

оценки возможности обнаружения по сигналам его шумоизлучения при неблагоприятных гидрологических условиях и воздействия помех.

Экспериментальные исследования проводились в южной части залива Петра Великого. На рис. 7 представлена схема проведения экспериментальных исследований.

На рис. 7 показаны места взаимного расположения обеспечивающего судна, размещения выносных устройств, измерительной аппаратуры, маршрут движения надводного объекта и профиль вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) при проведении экспериментальных исследований. Объект двигался по указанному маршруту со скоростью хода 8 узлов.

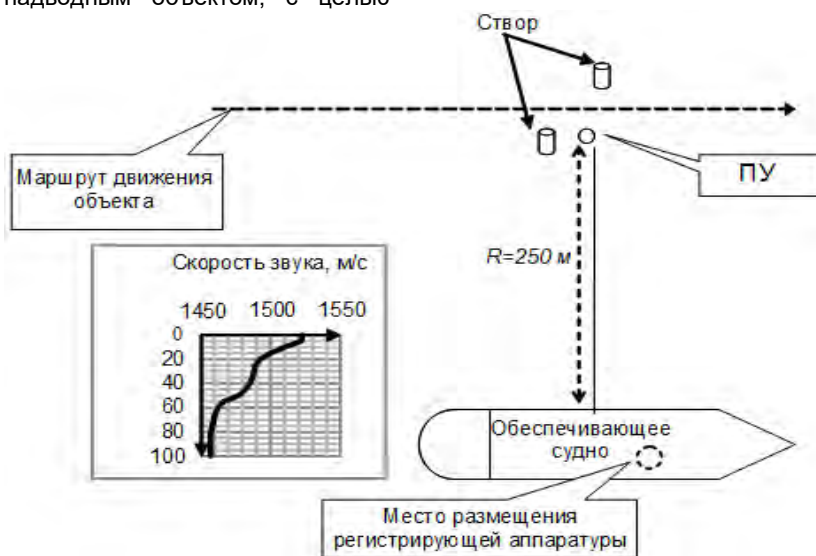


Рис. 7. Схема проведения экспериментальных исследований

На рис. 8 представлена проходная характеристика цели, записанная с ПУ.

Из анализа рисунка 8 видно, что с 190 по 420 сек

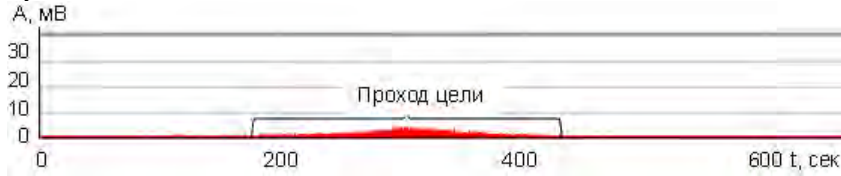
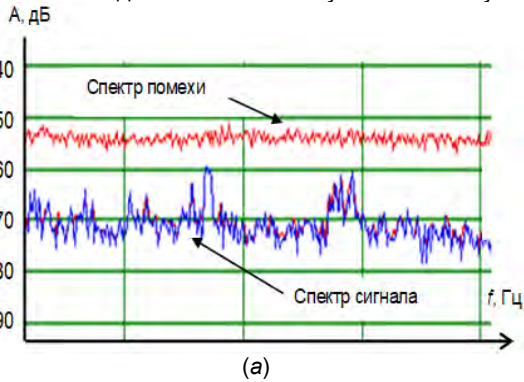


Рис. 8. Проходная характеристика объекта на скорости 8 узлов

С целью, приближенного создания реальных условий, в которых происходит распространения акустического сигнала в морской среде (наличие ГСС, различные степени волнения, шумы различного происхождения и т.д.) полученная реализация записи последовательно зашумлялась путем



проявляется проходная характеристика цели. Общая длительность записи составила 800 сек.

аддитивного добавления к ней белого гауссового шума. Таким образом, формировалась аддитивная смесь «сигнал+помеха» с различным входным ОСП от 0 до -10 дБ.

На рис. 9 представлены спектры несущей сигнала и помехи при разных параметрах входных ОСП.

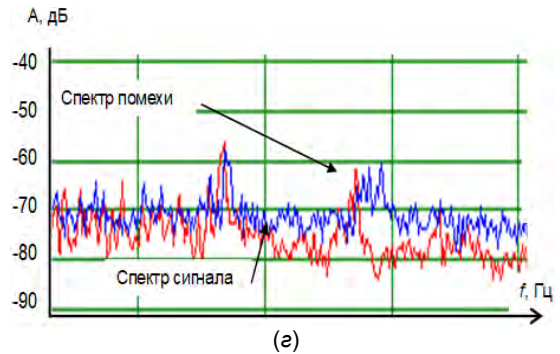
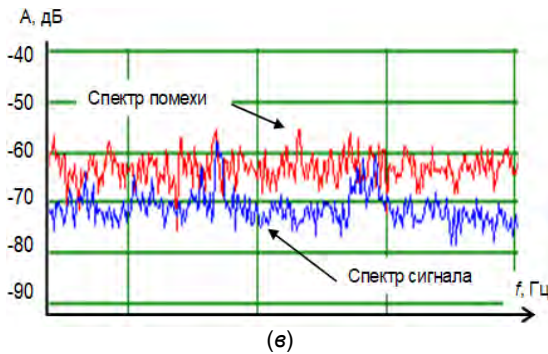
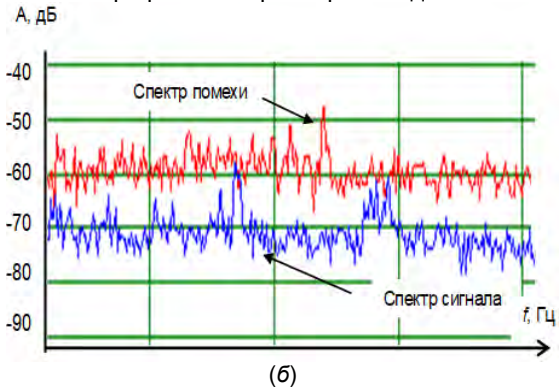
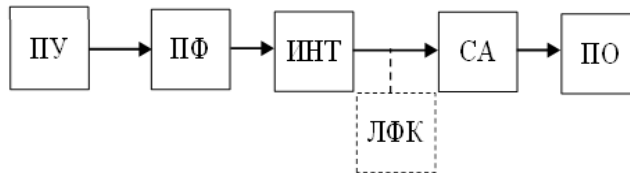


Рис. 9. Спектры несущей сигнала и помехи при разных входных ОСП: а – -10 дБ; б – -5 дБ; в – -2 дБ; г – 0 дБ

Полученные реализации сигналов обрабатывались при использовании классической схемы типового тракта обнаружения [6]: ПУ – полосовой фильтр (ПФ) – интегратор (ИНТ) –

спектроанализатор (СА) – пороговый обнаружитель (ПО) и разработанного алгоритма обработки, где в типовой тракт обнаружения был добавлен линейный фильтр Калмана (ЛФК), как показано на рис. 10.



ис. 10. Схема обработки сигналов с ПУ при применении фильтра Калмана

Для примера на рис. 11, представлены характерные результаты сравнительного анализа обработки сигналов шумоизлучения надводного объекта, движущегося со скоростью 8 узлов при

классической схеме обработки и с использованием разработанного алгоритма на основе линейного фильтра Калмана для входного ОСП -10 дБ.

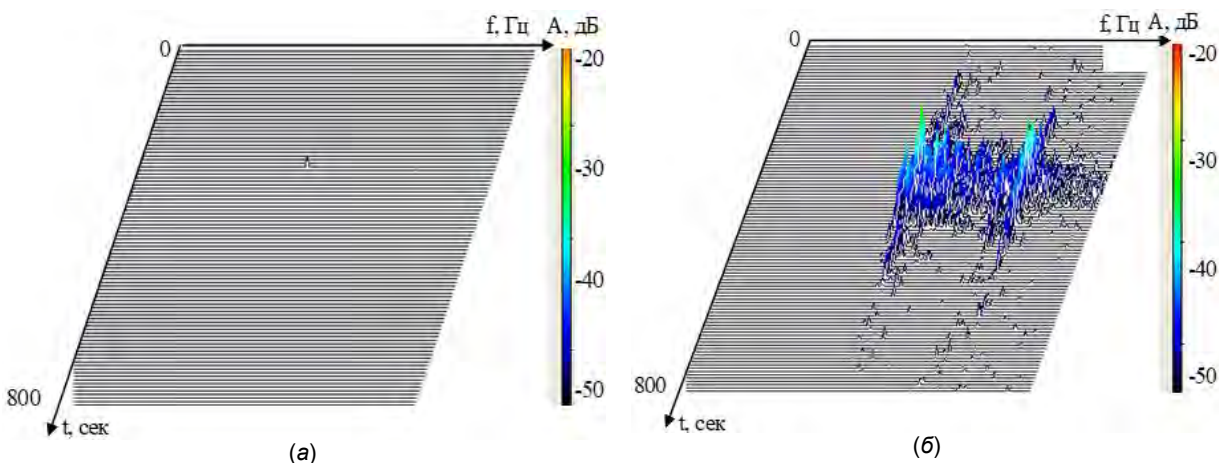


Рис. 11. Проходная характеристика объекта на скорости 8 узлов при входном ОСП -10 дБ: а – без применения ЛФК; б – с применением ЛФК

Оценка, полученных при проведении экспериментальных исследований результатов, осуществлялась путем превышения уровня сигнала шумоизлучения объекта над уровнем сплошной части спектра (СЧС) при применении ЛФК и без него.

Анализ рис. 11 показывает, что выходное ОСП при выделении сигналов шумоизлучения надводного объекта по классической схеме составило около 2 дБ (см. рис. 11, а) и 15 дБ с применением ЛФК (см. рис. 11, б).

Время наблюдения шумоизлучения объекта без обработки составляет примерно 3 секунды. Время наблюдения шумоизлучения при использовании адаптивного фильтра Калмана составило примерно 350 секунд.

На рис. 12 представлен сравнительный анализ, полученных реализаций после классической схемы обработки и при использовании ЛФК в виде зависимостей выходного ОСПвых от входного ОСПвх.

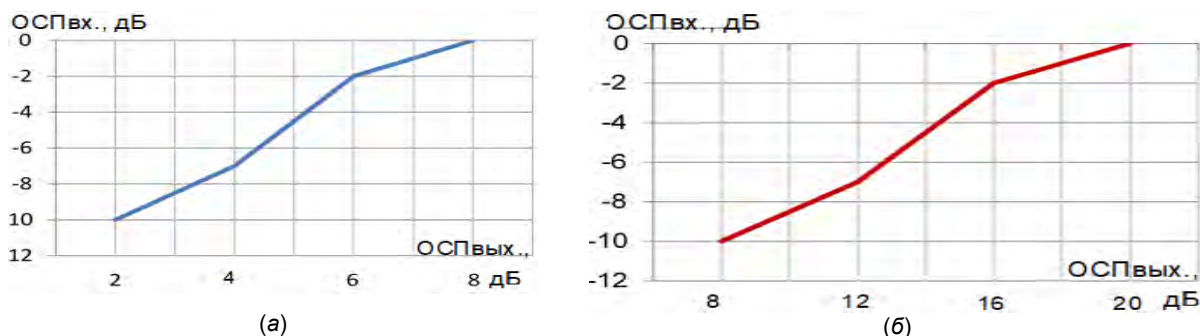


Рис. 12. График зависимости ОСПвых от ОСПвх: а – без применения ЛФК; б – с применением ЛФК

Из рис. 12 видно, что ОСПвых сигнала шумоизлучения объекта при применении ЛФК выше на 6 - 12 дБ, чем ОСПвых без него, для различных входных ОСПвх.

Оценка зависимости времени наблюдения за надводным объектом от входного отношения сигнал/помеха ОСПвх после использования ЛФК и без него представлена на рис. 13.

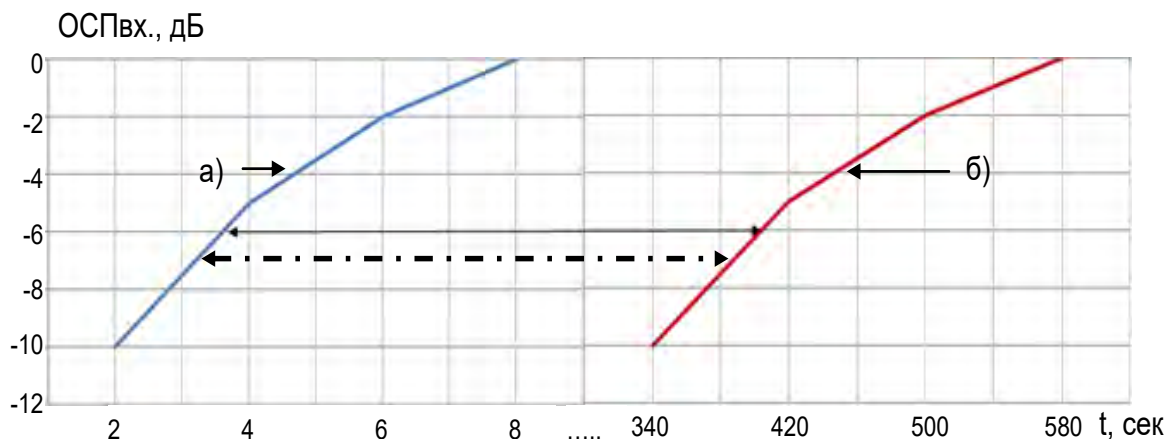


Рис. 13. Графики зависимости времени наблюдения за надводным объектом от входного ОСП: а – без применения ЛФК; б – с применением ЛФК

Из рис. 13 видно, что время наблюдения за надводным кораблем при различных входных ОСП

составило от 340 до 560 секунд при использовании ЛФК и 2 – 8 секунд без него.

Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что применение линейного фильтра Калмана при спектральном анализе сигналов шумоизлучения морских объектов, позволяют повысить выходное ОСП от 6 до 12 дБ при входных ОСП до – 10 дБ. Также предлагаемый

алгоритм обработки позволяет значительно увеличить время наблюдения за морскими целями, что приводит к возможности реализации способа обеспечения безопасного всплытия подводных объектов, в неблагоприятных гидрологических условиях, когда затруднено обнаружение сильношумящих целей.

Литература

1. Алексин В.А. Независимая газета, 2001 № 12.
2. Колмогоров В.С. Гетеродинные методы обработки гидроакустических сигналов в задачах освещения ближней обстановки. – Владивосток: ТОВМИ, 2009. - 204 с.
3. А.С. Котоусов, Оптимальная фильтрация сигнала и компенсация помех. Горячая Линия-Телеком. 2008.
4. Браммер Л. Фильтр Калмана-Бьюси/Л. Браммер, Г. Зифлинг. – М.: Наука, 1982. –200с
5. Программа адаптивной обработки и анализа шумоизлучения морского объекта «ANALIZ_KL». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613339 от 13.03.2019; авторы Викторов Р.В., Крупеньков А.В., Пашченко А.Ю. заявка № 2019611582 от 24.02.2019.
6. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. – 2-е изд., перераб. И доп. –Л.: издательство «Судостроение». 1988. – 288с., ил.– / Библиотека инженера гидроакустика/. 1981.

References

1. Aleksin V.A. Nezavisimaya gazeta, [Independent newspaper]. 2001, № 12.
2. Kolmogorov V.S. Geterodinnye metody obrabotki gidroakusticheskikh signalov v zadachakh osveshcheniya blizhney obstanovki. [Heterodyne methods for processing hydroacoustic signals in tasks of lighting the near environment]. Vladivostok, TOVMI, 2009. 204 p.
3. A.S. Kotousov, Optimal'naya fil'tratsiya signala i kompensatsiya pomekh. [Optimal signal filtering and interference compensation]. Goryachaya Liniya, Telekom. 2008.
4. Bramer L. Fil'tr Kalmana-B'yusi/L. [Kalman-Bucy Filter]. Bramer, G. Zifling. M.: Nauka, 1982. 200 p.
5. Programma adaptivnoy obrabotki i analiza shumozlucheniya morskogo ob'ekta "ANALIZ_KL". [Programm for adaptive processing and analysis of marine object noise emission does not"ANALIZ_KL"]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019613339 ot 13.03.2019; avtory Viktorov R.V., Krupen'kov A.V., Pashchenko A.YU. zayavka № 2019611582 ot 24.02.2019.
6. Evtyutov A.P., Mit'ko V.B. Inzhenernye raschety v gidroakustike. [Engineering calculations in sonar]. 2-e izd., pererab. I dop. L.: izdatel'stvo "Sudostroenie". 1988. - 288s., il. / Biblioteka inzhenera gidroakustika/. 1981.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Викторович Викторв, кандидат технических наук, профессор кафедры морского подводного вооружения, Тихоокеанское высше-военное училище им. С.О. Макарова, Камский переулок 7, Владивосток, 690062, Россия, e-mail: rusvictorov@yandex.ru

Михаил Владимирович Дягилев, кандидат технических наук, начальник кафедры устройства и живучести корабля, Тихоокеанское высше-военное училище им. С.О. Макарова, Камский переулок 7, Владивосток, 690062, Россия, e-mail: pva.natali@yandex.ru

Александр Владимирович Крупеньков, курсовой офицер-преподаватель, Тихоокеанское высше-военное училище им. С.О. Макарова, Камский переулок 7, Владивосток, 690062, Россия, e-mail: krupenkov.82@mail.ru

Ruslan V. Viktorov, Ph.D. (Eng.), Professor of the department of marine underwater weapons Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia e-mail: rusvictorov@yandex.ru

Mikhail V. Dyagilev, Ph.D. (Eng.), Director of the department of ship design and survivability Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov, Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia, e-mail: pva.natali@yandex.ru

Alexander V. Krupenkov, Course officer-teacher Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia, e-mail: krupenkov.82@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.073

УДК 004.8:656.614

Формирование обучающей выборки для информационной интеллектуальной системы организации и управления арктическими морскими грузоперевозками

С.В. Глушков¹, Е.Ю. Соболевская², Н.Г. Левченко¹¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Аннотация. Разработка информационной интеллектуальной системы организации и управления морскими грузоперевозками с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России является новым подходом для обеспечения процесса грузоперевозок. Реализован первый модуль для расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки на основе нечеткого вывода типа Мамдани на высокоуровневом языке программирования MATLAB с помощью интерактивного инструмента GUIDE математического пакета Matlab. Составлен перечень судов различных ледовых классов в соответствии с периодом навигации. Рассчитана средняя скорость в пути для судов одинакового ледового класса. Проанализированы рейсовые донесения капитанов ледоколов различных периодов и районов плавания. Сформирована обучающая выборка на основе рейсовых донесений капитанов ледоколов для настройки нечеткой модели типа Мамдани для информационной интеллектуальной системы организации и управления морскими грузоперевозками с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России. Выборка на натуральных данных позволит обучить/настроить нечеткую модель типа Мамдани. В результате настройки модели типа Мамдани для модуля расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки будет получена новая нечеткая модель, которая позволит предоставлять судоходной компании, экипажу судна прогнозную аналитику. Обучение модели на сформированной выборке увеличит процент достоверности прогноза. Обученная/настроенная нечеткая модель типа Мамдани является основным компонентом информационной интеллектуальной системы организации и управления морскими грузоперевозками с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России.

Ключевые слова: морские грузоперевозки, Арктика и Субарктика, системы нечеткого вывода, арктическая навигация, нечеткая логика, нейронные сети, компьютерное моделирование, интеллектуальные информационные технологии, рейсовые донесения капитанов.

Formation of training sample for information intelligent system of organization and management of arctic sea cargo transportation

Sergey V. Glushkov¹, Evgenia Y. Sobolevskaya², Natalya G. Levchenko¹¹Maritime State University. adm. G.I. Nevelskoy, ²Vladivostok State University of Economics and Service

Abstract. Development of an information intelligent system of organization and management of sea cargo transportation considering difficult sailing conditions in the Arctic and subarctic Russia is a new approach to ensure the process of transportation. The first module for calculating the cost of sea cargo transportation taking into account the ice situation on the basis of Mamdani fuzzy logic system in the high-level programming language MATLAB with the help of the GUIDE interactive tool in the Matlab math package has been implemented. The list of vessels of various ice classes has been made according to the navigation period. The average speed in a way for vessels of the same ice class has been calculated. Voyage reports of icebreaker captains of different periods and navigation areas have been analyzed. A training sample has been formed on the basis of voyage reports of icebreaker captains to set up a Mamdani fuzzy logic model for the information intelligent system of organization and management of sea cargo transportation taking into account difficult navigation conditions in the Arctic and subarctic Russia. Sampling on field data will allow to train / adjust the Mamdani fuzzy logic model. As a result of setting up the Mamdani fuzzy logic model for the module for calculating the cost of sea cargo transportation, taking the ice situation into account, a new fuzzy logic model will be obtained, which will allow to provide the shipping company and the vessel crew with predictive Analytics. Training the model on the generated sample will increase the percentage of reliability of the forecast. The trained / adjusted Mamdani fuzzy logic model is the main component of information intelligent system of organization and management of sea cargo transportation taking into account difficult navigation conditions in the Arctic and subarctic Russia.

Keywords: sea cargo transportation, Arctic and Subarctic, fuzzy logic systems, Arctic navigation, fuzzy logic, neural networks, computer modeling, intelligent information technologies, voyage reports of captains.

Введение

В связи с глобальными климатическими изменениями, а именно интенсивным таянием льдов, в последнее время интерес представляют морские грузоперевозки в Арктической и Субарктической зоне России.

Обеспечение доставки груза в полярных условиях зависит от многих факторов, например, суровые климатические условия, наличие льдов, отсутствие

развитой инфраструктуры, обеспечивающей процессы морских грузоперевозок [1].

Разработка информационной интеллектуальной системы организации и управления морскими грузоперевозками (ИИС ОУМГ) с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России является новым подходом для обеспечения процесса грузоперевозки.

Основными целями интеллектуализация процесса организации грузоперевозок морским транспортом являются: повышение эффективности логистической инфраструктуры и качества работы портов, системы транспортировки грузов [2].

Модель нечёткого вывода типа Мамдани

В первую очередь была разработана архитектура ИИС ОУМГ с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России и архитектуры двух модулей:

– первый модуль для расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки;

– второй модуль на основе расчетов первого модуля рассчитывает более быстрый (дни в пути) или экономически выгодный (стоимость) маршрут в зависимости от периода плавания (времени года) с учетом ледовой обстановки [3].

Затем выделены основные термы лингвистических переменных, послужившие основой при формировании базы, правил нечетких продукций для модели нечеткого вывода типа Мамдани.

Далее был реализован первый модуль нечёткого вывода типа Мамдани на высокоуровневом языке программирования MATLAB с помощью интерактивного инструмента GUIDE, который представлен на рис. [4].

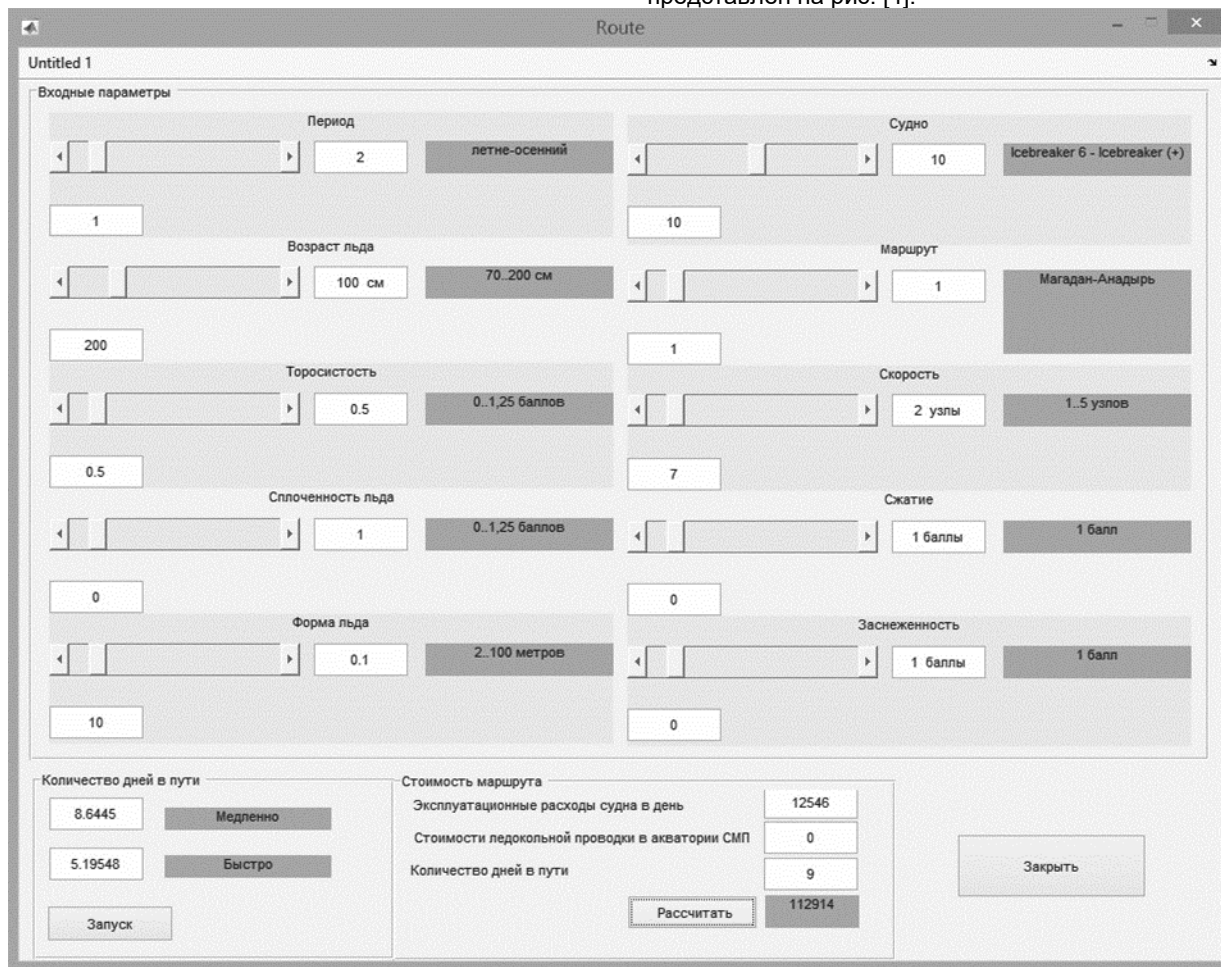


Рис. Визуализация БПНП нечёткого вывода типа Мамдани

Данный модуль реализует работу нечёткого вывода типа Мамдани и позволяет рассчитать стоимость затрат на маршрут и количество дней в пути в арктических условиях плавания.

Входными данными программы являются период плавания, вектор параметров ледовой обстановки (возраст льда; торосистость; сплоченность льда; форма льда; сжатие; заснеженность), ледовый класс судна, скорость судна, маршрут плавания.

Программа обеспечивает:

- подключение базы правил нечетких продукций (БПНП);
- вычисление количества дней в пути с учетом входных параметров;

– расчет стоимости маршрута.

Результат работы программы – это количество дней в пути и стоимость маршрута.

Основой данной программы является система нечёткого вывода типа Мамдани, и сформированная БПНП, реализованная посредством Fuzzy Logic Toolbox математического пакета Matlab.

БПНП модуля для расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки основана на расчётных данных.

При составлении расчетной БПНП выделены суда с различными ледовыми классами в соответствии с периодом навигации [5], и их скоростью. Фрагмент представлен в табл. 1.

Таблица 1

Ледовые классы судна и скорость плавания

Название/Номер проекта	Характеристики	
	Категория ледового усиления/Ледовый класс	скорость, уз
Ролкеры		
Капитан Смирнов/1609	Ice2	25
Лихтеровозы		
Севморпуть/10081	Arc5	19,83
Рефрижераторные суда		
Кристалл II/ФЭБ Матиас Тезен	Arc4	17,4
Академик Вавилов	Ice3	20,3
Сухогрузные суда универсального назначения грузоподъемностью более 5 тыс. тонн		
Парижская коммуна/567	Ice2	19,2
Сухогрузные суда универсального назначения грузоподъемностью менее 5 тыс. тонн и для перевозки тяжеловесных грузов		
Стахановец Котов/0217	Arc4	14,2
Сухогрузные суда ограниченного района плавания		
Василий Шукшин/1588	Ice3	13
Многоцелевые сухогрузные суда с комбинированной грузообработкой		
Астрахань-I/121	Ice3	16,7
Ледокольно-транспортные сухогрузные суда		
Норильск/SA-15	Arc7	17
Лесовозы и щеповозы		
Николай Новиков/B-436	Arc4	15,5
Суда для перевозки навалочных грузов		
Харитон Греку/15941	Ice2	14,2
Суда для перевозки сырой нефти и нефтепродуктов		
Морис Бишоп(Людвик Свобода)/2226A	Ice3	15,6
Судно обеспечения		
СКФ Эндевор	Arc6	15,0
Ледоколы		
Арктика/10520	Icebreaker8	21
Россия/10521	Icebreaker9	21

Для модуля расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки не принимается во внимание основной тип судна, а только класс ледового усиления, для расчета времени в пути необходимо знать среднюю скорость судна. Расчет средней скорости для судов одинакового ледового класса выполнялся по формуле простой средней гармонической [6] с учетом, что судно прошло один и тот же путь.

$$\bar{x}_{\text{гарм}} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{x_i}} = \frac{1+1+\dots+1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}, \quad (1)$$

где, n – общее число вариантов;

x – отдельные значения признака;
1/x – отдельные варианты обратного признака, встречающиеся по одному разу.

Для формирования БПНП необходимо знать примерную скорость судна с учетом условий плавания.

Средняя скорость каждого ледового класса на чистой воде необходима для составления правил для БПНП (табл. 2).

Таблица 2

Средняя скорость на чистой воде с учетом ледового класса

Ледовый класс судна	Средняя гармоническая скорость, уз
Arc4	14,05255
Arc5	15,16577
Arc6	15,50139
Arc7	16,28203
Arc8	17,1453
Arc9	17,50601
Ice1	15,46477
Ice2	19,01009
Ice3	23,93693
Icebreaker6	15,36273
Icebreaker7	17,97144
Icebreaker8	18,18247
Icebreaker9	20,94964

Только суда ледового класса могут плавать во льдах плавать во льдах до 7 баллов [7], следовательно, выделены ледовые классы судов.

При формировании расчетной БГНП учитывались все возможные характеристики ледовой обстановки, что позволяет моделировать различные вариации, тем самым прогнозировать безопасное плавание во льдах и ледовые условия.

БГНП на расчетных данных приближенна к реальным данным, но не учитывает реальный опыт, только обучение модели на натурных данных позволяет утверждать о правильности расчетов и прогнозов.

Следовательно, необходимо сформировать выборку на натурных данных из рейсовых донесений капитанов ледоколов для обучения модели нечеткого вывода типа Мамдани расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки.

Формирование обучающей выборки

Для формирования обучающей выборки проанализированы следующие рейсовые донесения капитанов:

- 1980 г. - ледокол «Адмирал Макаров» - Нагаевская навигация;
- 1980 г. - ледокол «Ермак» - Нагаевская навигация;
- 1981 г. - ледокол «Адмирал Макаров» - Магаданская навигация;

- 1985 г. - ледокол «Ермак» - Татарский пролив и Охотское море;
- 1987 г. - ледокол «Ленинград» - Татарский пролив и Охотское море;
- 2000 г. - ледокол «Красин» - Зимняя навигация в Анадырском заливе;
- 2001 г. - ледокол «Красин» - Охотское море;
- 2002-2003 г. - ледокол «Красин» - навигация у платформы Моликпак;
- 2003 г. - ледокол «Красин» навигация у платформы Моликпак;
- 2010-2011 г. - ледокол «Макаров» навигации в Татарском проливе (Де-Кастри);
- 2013-2014 г. - ледокол «Магадан» навигации в порту Магадан.

Рейсовые донесения капитана позволяют сформировать более точную картину ледовой обстановки. Как указано в данных донесениях, не всегда ледовые карты-схемы, данные авиации и так далее совпадают с реальной обстановкой.

Для настройки модели нечеткого вывода типа Мамдани сформирована выборка на основе рейсовых донесений капитанов ледоколов.

Рейсовые донесения капитана содержат информацию о ледовой обстановке на маршруте, времени в пути, пройденное расстояние и среднюю скорость в пути, что и позволило сформировать выборку, фрагмент которой представлен в табл. 3.

Таблица 3

Данные рейсовых отчетов капитанов

Наименование судна	Дата / Период	Маршрут	Пройденное расстояние, мили	Время в пути	Средняя скорость, уз	Ледовые условия						
						Возраст льда	Разрушенность	Торосистость	Сплошность льда	Форма льда	Сжатие	Заснеженность
Л/К «Магадан»	29.01.2014 – 30.01.2014	58°22,9'N, 151°34,5'E – п. Магадан	96	10:05	9,5	серо-белый лёд 15–20 см				поля		
						серый лёд						
							молодой лёд		10		2	
Л/К «Адмирал Макаров»	04.01.11 – 05.01.11	54°12,3' N 142°20,7 E – 54°19,9' N 141°53,6'E	23,6	19	4,7	напрессовка серо-белого, белого льда			10	обломки полей, мелкобитый, тертый лёд	1–2	
						серо-белый, белый лёд				сморозь, поля мелкобитого, тертого льда	2–3	3
						белый, серо-белый лёд					2	2–3
Л/К «Адмирала»	22.03.1980	57°48' N 153°27' E – 58°18' N 152°12' E	55,8**		Не более 7	серо-белый лёд, белый лёд		2	8	сплошная сморозь	1–2	

Пройденное расстояние не всегда было указано в рейсовых донесениях капитана, но является необходимым для составления обучающей выборки. Зато известен маршрут, что позволяет рассчитать

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right), \quad (2)$$

где φ_2, φ_1 широта двух точек; λ_2, λ_1 долгота двух точек.

Значения рассчитанного расстояния и реального по маршруту следования могут отличаться в большую сторону, так как судно в процессе

расстояния между двумя точками по координатам. Воспользуемся формулой гаверсинусов (2) для определения небольших расстояний [8].

следования, например, огибает поля льда, обходит айсберги и так далее.

Для формирования обучающей выборки на одном маршруте выберем самые суровые факторы, фрагмент данных представлен в табл. 4.

Таблица 4

Выборка натуральных данных

Период	Возраст льда, см	Разрушенность	Торосистость	Сплоченность льда	Форма льда, м	Сжатие	Заснеженность	Судно/класс	Средняя скорость в узлах	Время в пути	Пройденное расстояние, мили
2	20				500			Icebreaker6	9,5	10:05	96
2	70			10	500			Icebreaker6	8,2	14:20	118
2	70				500			Icebreaker6	10,1	17:15	127
2	30				2			Icebreaker6	11,7	30:35	136
2	70			8	500			Icebreaker6	7,9	1д 12ч 40м	212

Время в пути в рейсовых донесениях капитанов указано, то в часах, то в днях, приведем к общему: дни/сутки. Для обучения модели время необходимо для расчета времени в пути.

Один час равен 60 минутам или 3600 секундам, а в сутках 24 часа, следовательно, один час равен 0,0416 суток/дней.

На основе табл. 4 составили обучающую выборку для настройки модели типа Мамдани, фрагмент которой представлен в табл. 5.

Таблица 5

Выборка натуральных данных для настройки модели

Период	Возраст льда, см	Разрушенность	Торосистость	Сплоченность льда	Форма льда, м	Сжатие	Заснеженность	Судно/класс	Средняя скорость в узлах	Дни в пути	Пройденное расстояние, мили
8	20	0	0	0	500	0	0	8	9,5	0,42	96
8	70	0	0	10	500	0	0	8	8,2	0,59	118
6	70	0	0	0	500	4	0	8	10,1	0,71	127
10	30	0	0	0	2	0	0	8	11,7	1,26	136
10	70	0	0	8	500	0	0	8	7,9	1,52	212

Выборка на натуральных данных позволит обучить/настроить нечеткую модель типа Мамдани.

В результате настройки модели типа Мамдани для модуля расчета стоимости морских грузоперевозок с учетом ледовой обстановки будет получена новая нечеткая модель, которая позволит предоставлять судоходной компании, экипажу судна прогнозную аналитику. Обучение данной модели на сформированной выборке увеличивает процент достоверности прогноза.

Обученная/настроенная нечеткая модель типа Мамдани является основным компонентом ИИС ОУМГ с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России.

Заключение

Проанализированы рейсовые донесения капитанов по различным периодам и районам плавания.

Сформирована обучающая выборка для настройки нечеткой модели типа Мамдани для ИИС ОУМГ с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России.

Обученная/настроенная нечеткая модель типа Мамдани для ИИС ОУМГ с учетом сложных условий плавания в Арктике и Субарктике России позволит получить схему наиболее эффективного использования флота и прогноз ледовой обстановки на маршруте следования учитывая класс судна, период плавания, скорость в пути.

Литература

1. Лентарев, А. А. Перспективы использования интеллектуальных систем в управлении Северным морским путем / А. А. Лентарев, Н. Г. Левченко // Морские интеллектуальные технологии. – 2016. – Т. 1. № 3 (33). – С. 355–359.
2. Малыгин, И.Г. Интеллектуальные технологии на водном транспорте / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский, М.А. Асаул // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Т. 2. № 2 (36) – С. 55–65.
3. Соболевская, Е. Ю. Архитектура интеллектуальной системы организации арктических морских грузоперевозок / Е.Ю. Соболевская, С. В. Глушков, Н. Г. Левченко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 4 (19). – С. 27 – 38.

4. Соболевская, Е.Ю. Разработка интеллектуальной системы морских грузоперевозок в арктических условиях – формирование базы правил нечётких продукций на базе системы нечёткого вывода типа Мамдани / Е.Ю. Соболевская, С.В. Глушков, Н.Г. Левченко // Транспортное дело России. – 2019. – № 2 – С. 154–158.
5. Российский Морской Регистр Судоходства [Электронный ресурс]: <https://rs-class.org/> – Режим доступа: (дата обращения: 25.08.19).
6. Балинова, В.С. Статистика в вопросах и ответах: учебное пособие / В.С.Балинова – М.: ТК Велби, изд-во Проспект, 2004. – 344 с.
7. Морское судоходство / Г.Г. Ермолаев [и др.]; под ред. Г.Г. Ермолаев. – М.: изд-во Транспорт, 1970. – 375 с.
8. Верюжский, Н.А. Мореходная астрономия. Основы сферической астрономии. Координаты небесных светил. Видимое суточное движение светил: учебно-методическое пособие / Н.А. Верюжский – М.: изд-во РКонсульт, 2006. – 164 с.

References

1. Lentarev, A. A. Perspektivy ispol'zovaniya intellektual'nyh sistem v upravlenii Severnym morskim putem [Prospects for the use of intelligent systems in the management of the Northern sea route] / A. A. Lentarev, N. G. Levchenko / Marine intelligent technologies. - 2016. - Т. 1. No. 3 (33). Pp. 355-359.
2. Malygin, I. G. Intellektual'nye tekhnologii na vodnom transporte [Intellectual technologies on water transport] / I. G. Malygin, V. I. Komashinsky, M. A. Asaul // Marine intellectual technologies. - 2017. - Т. 2. No. 2 (36) - Pp. 55-65.
3. Sobolevskaya, E. Yu. Arhitektura intellektual'noj sistemy organizatsii arkticheskikh morskikh gruzoperevozok [Architecture of intellectual system of organization of Arctic sea cargo transportation] / S. V. Glushkov, N. G. Levchenko // Modeling, optimization and information technologies. - 2017. - No. 4 (19). - Pp. 27-38.
4. Sobolevskaya, E. Yu. Razrabotka intellektual'noj sistemy morskikh gruzoperevozok v arkticheskikh usloviyah – formirovanie bazy pravil nechyotkih produkciy na baze sistemy nechyotkogo vyvoda tipa Mamdani [Development of intellectual system of sea cargo transportation in Arctic conditions-formation of base of rules of fuzzy productions on the basis of system of fuzzy inference of Mamdani type] / E. Yu. Sobolevskaya, S. V. Glushkov, N. G. Levchenko // Transport business of Russia. - 2019. - No. 2-Pp. 154-158.
5. Rossijskij Morskoy Registr Sudohodstva [Russian Maritime Register of Shipping] [Electronic resource]: <https://rs-class.org/> - access Mode: (accessed 25.08.19).
6. Balinova, V. S. Statistika v voprosah i otvetah: uchebnoe posobie [Statistics in questions and answers: textbook] / V. S. Balinova-M.: TK Welby, publishing house Prospect, 2004. - 344 p.
7. Morskoe sudovozhdenie [Marine navigation] / G. G. Ermolaev [et al.]; under the editorship of G. G. Ermolaev. - Moscow: Transport publishing house, 1970. – 375 PP.
8. Veryuzhsky, N. A. Morekhodnaya astronomiya. Osnovy sfericheskoy astronomii. Koordinaty nebesnykh svetil. Vidimoe sutochnoe dvizhenie svetil: uchebno-metodicheskoe posobie [Nautical astronomy. Fundamentals of spherical astronomy. Coordinates of celestial bodies. The apparent daily motion of stars: a teaching manual] / N. A. And. Veryuzhsky – M.: publishing house of Consult, 2006. - 164 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Витальевич Глушков, доктор технических наук, профессор, декан электромеханического факультета, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхне-портовая, 50 а, e-mail: glushkov@msun.ru

Евгения Юрьевна Соболевская, старший преподаватель кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690014, г. Владивосток, ул.Гоголя 41, e-mail: study_z@list.ru

Наталья Георгиевна Левченко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических и информационных систем, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхне-портовая, 50 а, e-mail: levchenko@msun.ru

Sergey V. Glushkov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dean of the Electromechanics department, Maritime State University. adm. G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50 а, e-mail: glushkov@msun.ru

Evgenia Y. Sobolevskaya, Senior Lecturer, Department Information Technology and Systems, Vladivostok State University of Economics and Service, 690014, Vladivostok, Gogolya St. 41, e-mail: study_z@list.ru

Natalya G. Levchenko, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic and Information Systems, Maritime State University. adm. G.I. Nevelskoy, 690003, Vladivostok, Verkhneportovaya St., 50 а, e-mail: levchenko@msun.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.076

УДК: 629.12.001.2

Цифровизация морского надзора в дальневосточном регионе

М.В. Гомзяков¹, А.Н. Соболенко²

¹Дальневосточное управление государственного морского надзора,

²Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

Аннотация. Целью настоящей работы является изучение возможности управления качеством торгового мореплавания с помощью ведомственных информационных ресурсов. Для достижения результата требуется решение следующих задач: обзор существующих систем в части морской транспортной деятельности и рыболовства; исследовать функции IT-ресурсов в предметной области; определить перспективные подходы для повышения безопасности мореплавания. В работе приводится обзор существующих морских профессиональных информационных систем и результаты исследования их функционала на предмет учета аварийных случаев на море. Государственные ведомственные информационные системы практически не производят обмен данными. Анализ действующей информационной среды производится с целью выработки подходов к управлению рисками при эксплуатации морского судна и его технических средств. Исследование возможностей существующих информационных ресурсов позволяет сделать вывод о необходимости постоянного обмена данными и интеграции систем в единый комплекс управления рисками.

Ключевые слова: надзор, информационная система, судовые технические средства, аварийность на море, управление рисками

Digitalization of maritime surveillance in the far eastern

Mihail V. Gomzyakov¹, Anatoly N. Sobolenko²

¹The Far East Directorate for State of Maritime Supervision, ²Maritime State University

Abstract. The article informs about the possibilities of managing the quality of merchant shipping by using departmental information resources. To achieve the result, the following tasks are required: a review of existing professional web systems; compare the functions of merchant IT resources; identify promising approaches to improve the safety of navigation. The article provides an overview of existing marine professional information systems and their functionality for accounting of accidents at sea. The information environment analysis carried out to develop approaches to risk management for a marine vessel and ship technical equipment. The interoperability of marine information systems at present is very weak. The State departmental information systems practically do not produce mutual data flow. The lack of digital cooperation worsens maritime safety. The main conclusion of the article provides that all existing merchant IT resources must be integrated into a single risk management complex and produce mutual data flow on-line.

Keywords: supervision, information system, ship technical equipment, accident rate at sea, risk management, data flow.

Введение

Создание цифровой инфраструктуры для российской экономики является ключевым фактором для народно-хозяйственной деятельности страны. Повышение качества и оперативности при взаимодействии участников производственных процессов закладывают предпосылки для эффективного роста экономики во всех отраслях. Торговое мореплавание, наряду с другими сферами деятельности, нуждается в современной информационной среде, позволяющей динамично реагировать на внешние вызовы: технические, нормативные, социальные и другие.

В настоящее время в морской отрасли в рамках Программы цифровизации России [1] вполне успешно внедряются ведомственные цифровые платформы, однако их интероперабельность не соответствует запросам участникам торгового мореплавания.

1. Основные положения

Целью настоящей работы является изучение возможности с помощью ведомственных информационных ресурсов управлять качеством торгового мореплавания. Для достижения результата требуется решение следующих задач: обзор существующих систем в части морской транспортной деятельности и рыболовства;

исследование функций IT-ресурсов в предметной области; определение перспективных подходов для повышения безопасности мореплавания.

Под информационным ресурсом понимается совокупность данных, систем управления базами данных и прикладных программ, взаимодействующих как система в парадигме назначенного функционала.

Корпоративная информационная система – это программное обеспечение, обеспечивающее одну или несколько функций организации и размещенное на ее локальной сети.

Программное обеспечение с удаленным доступом через интернет относится к веб-приложениям.

Системы могут быть открытого [5, 6, 8] или закрытого [9, 10] доступа, полностью или частично [3].

Функциональность программ оценивается с позиций возможностей для воздействия на качество эксплуатации объектов морского транспорта. К одной из таких возможностей относится надзор за мореплаванием в виде проверок компаний-судовладельцев и осмотров судов.

Некоторые ресурсы оперируют информацией общегражданского назначения, без которой ряд сугубо морских ИС функционировать в полном объеме не может.

2. Морские информационные системы для контроля и надзора АС «МОНИТОРИНГ»

Автоматизированная система мониторинга и формирования аналитических отчетов деятельности Федеральной службы по надзору в сфере транспорта АС «Мониторинг» (АСМ) разработана компанией "КУРС-ИТ" для сбора, консолидации и анализа ведомственной и статистической отчетности об осуществлении государственного надзора в сфере транспорта [4]. Пользователями ресурса являются работники Федеральной службы по надзору в сфере транспорта (ФСНСТ), выполняющие надзорные функции. Владелец системы - Минтранс РФ, координатор - правовое управление ФСНСТ. АСМ представляет собой ведомственную прикладную информационную систему, введенную в промышленную эксплуатацию в 2011 году.

Основными функциями АСМ являются:

- сбор статистической отчетности по видам транспорта, включая водный транспорт;
- подготовка форм внешней и внутренней отчетности;
- обеспечение поэтапной подготовки планов проверок юридических лиц и индивидуальных предпринимателей (планов проверок);
- составление сводного плана проверок Ространснадзора;
- проверка реквизитов планируемых субъектов по базам ФНС;
- контроль исполнения ежегодных планов проверок;
- ведение реестра категории риска компаний-судовладельцев и классов опасностей эксплуатантов портовых гидротехнических сооружений (ГТС);
- ведение реестра мониторинга резонансных судебных дел;
- ведение реестра поднадзорных субъектов государственного надзора;
- синхронизация с открытыми данными федеральной государственной информационной системы Единый Реестр проверок (ФГИС ЕРП);
- сверка планов проверок с полной выпиской из Единого государственного реестра юридических лиц (ЕГРЮЛ).

В состав АС «Мониторинг» входят следующие подсистемы: Центральная подсистема; подсистема Госжелдорнадзора; подсистема Госавтодорнадзора; подсистема Госморречнадзора; подсистема Госавианадзора; подсистема УТБ. Зарегистрированных пользователей – более 300 по всем подсистемам. В рамках данной работы рассматривается функционал подсистемы Госморречнадзора (рис. 1).

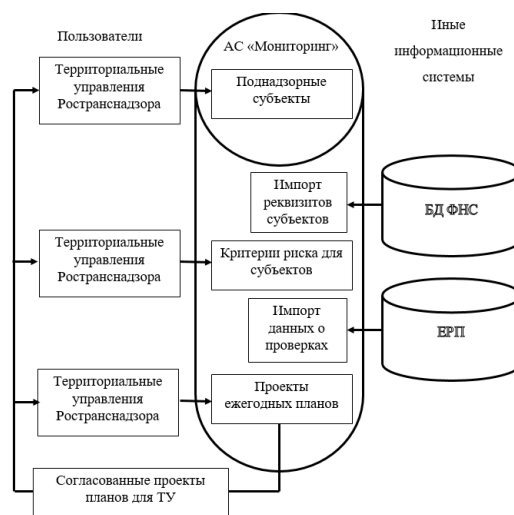


Рис. 1. Блок-схема подсистемы Госморречнадзора

Распределение информационных потоков в подсистеме осуществляется следующим образом. Ключевым звеном АСМ является субъект – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель (ЮЛ). При поступлении в территориальные управления (ТУ) информации о начале предпринимательской деятельности субъектом, его реквизиты заносятся в БД АСМ. ТУ ежегодно перед составлением планов проверок ЮЛ производят категорирование подконтрольной сферы. Критерии категорий риска (КР) регламентированы Положением о государственном транспорте надзоре, изм. Постановлением Правительства РФ от 17.02.2018 № 173. В установленные сроки ТУ формируют проект плана (с 2019 года с учетом КР) и вносят его в АСМ. Система сверяет реквизиты планируемых субъектов с реквизитами из БД Федеральной налоговой службы (ФНС), а также сроки последних плановых проверок со сроками в Едином реестре проверок (ЕРП). После сверки данных с указанными ИС происходит согласование сроков проверок, которые в отношении отдельного ЮЛ осуществляют несколько надзорных органов, например, при проверке бункеровочной компании на предмет перевозки грузов морем и железной дорогой контроль за соблюдением обязательных требований осуществляют Госморречнадзор, Госжелдорнадзор, Росприроднадзор и, в отдельных случаях, Ростехнадзор. Согласованный проект выгружается из АСМ территориальным управлением для направления в органы прокуратуры и согласования с всеми контролирующими органами, включившими данную компанию в проект плана. Двухэтапное согласование позволяет снизить надзорную нагрузку на бизнес. В последние дни календарного года согласованный окончательно план территориальными управлениями загружается в АСМ для исполнения. Результаты выполнения плана и другие статистические данные направляются заинтересованным участникам (на схеме не показаны).

3. Единый Реестр Проверок (ЕРП)

Федеральная государственная информационная система (ФГИС) Единый реестр проверок является государственным информационным ресурсом, обладателем информации которого является Российская Федерация. ФГИС ЕРП разработана согласно Постановлению Правительства РФ от 28 апреля 2015 г. № 415 «О Правилах формирования и ведения Единого реестра проверок». Основная цель системы – учёт плановых и внеплановых проверок подконтрольных субъектов, включая информацию об их результатах и принятых мерах.

Оператором ФГИС ЕРП по согласованию с Министерством экономического развития Российской Федерации является Генеральная прокуратура РФ.

ФГИС ЕРП позволяет реализовать следующие функции [3]:

- формирования и ведения реестра проверок ЮЛ и учет результатов таких проверок;
- формирование в электронной форме ежегодного сводного плана проведения плановых проверок и сведений об их результатах;
- автоматизация процессов рассмотрения и согласования в органах прокуратуры заявлений надзорных органов о проведении внеплановых проверок ЮЛ;
- согласование совместных проверок несколькими надзорными органами в отношении одного субъекта;
- предоставление неограниченному кругу лиц общедоступной информации посредством ее размещения оператором на специализированном сайте в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» в форме открытых данных.

Входной информацией в ИС являются направляемые территориальными надзорными органами для согласования ежегодные планы и сведения об исполнении проверок.

На выходе веб-сервиса ЮЛ, осуществляющие деятельность в предметной области, могут получить их ФГИС ЕРП информацию следующих видов:

- сроки плановых и внеплановых проверок ЮЛ в течение текущего года
- результаты проведения проверок в электронной форме;
- основание(документы), на котором проводятся или проведены проверки;
- информация о документах, подтверждающих результаты проверок.

4. Единый реестр субъектов малого и среднего предпринимательства

Единый реестр субъектов малого и среднего предпринимательства (Реестр МСП) начал функционировать с 1 августа 2016 года.

Ведение Реестра МСП осуществляется Федеральной налоговой службой (ФНС).

Целью создания ИС было разграничение ЮЛ по размеру предпринимательской деятельности, чтобы в дальнейшем выработать меры поддержки малому бизнесу.

Отнесение субъектам малого и среднего предпринимательства, в Реестр МСП и исключение таких сведений из указанного реестра осуществляются ФНС на основании:

- сведений, содержащихся в Едином государственном реестре юридических лиц (ЕГРЮЛ), Едином государственном реестре индивидуальных предпринимателей (ЕГРИП);

- представленных в соответствии с законодательством Российской Федерации о налогах и сборах сведений о среднесписочном количестве работников за предшествующий календарный год, о доходе, полученном от предпринимательской деятельности за тот же период, сведений о применении специальных налоговых режимов в предшествующем календарном году;

- сведений, представленных поставщиками для ЮЛ;

- сведений, представленных самими ЮЛ.

Статус, присвоенный ЮЛ в Реестре МСП имеет большое значение при формировании плана, поскольку от него зависит продолжительность проверки или даже полная ее отмена в случае надзорных каникул в 2016-2018 гг. Информация Реестра МСП доступна неограниченному кругу лиц [5]. На рисунке 2 приведено распределение субъектов МСП по регионам РФ.



Рис. 2. Количество субъектов малого и среднего предпринимательства

5. Единый государственный реестр юридических лиц/индивидуальных предпринимателей

Единый государственный реестр юридических лиц/индивидуальных предпринимателей (ЕГРЮЛ/ЕГРИП) – это веб-сервис, разработанный в 2001 году с целью бесплатного предоставления сведений о конкретном ЮЛ в форме электронного документа.

ИС предоставляет возможность заинтересованным лицам бесплатно получить сведения из ЕГРЮЛ/ЕГРИП о конкретном ЮЛ в виде выписки в формате .pdf. Сформированная выписка (справка) содержит усиленную квалифицированную электронную подпись и ее визуализацию (в том числе при распечатывании выписки/справки). Сведения в сервисе актуализируются ежедневно.

Выходными данными сервиса являются: статус ЮЛ (действующий/не действующий), юридические реквизиты, коды экономической деятельности, информация о лицензиях.

При формировании плана реквизиты субъекта проверяются несколько раз:

- территориальным органом перед загрузкой проекта плана в АСМ;
- средствами АС «Мониторинг»;
- после выгрузки из АСМ перед направлением в органы прокуратуры;
- органами прокуратуры;

- в процессе выполнения плана перед каждой проверкой;
- при квартальных свертках планов.

6. Информационная система госконтроля судов, оперирующих под российским флагом

Информационная система госконтроля судов, оперирующих под российским флагом (ИСГС) является рабочим инструментом государственного портового контроля (ГПК). Оператор системы – Росморречфлот.

Ключевой ячейкой системы является судно.

В соответствии с Кодексом торгового мореплавания РФ ГПК осуществляется службой капитана морского порта в целях контроля:

- наличия судовых документов;
- соответствия основных характеристик судов судовым документам;
- выполнения требований, касающихся безопасности мореплавания и защиты морской среды от загрязнения с судов;
- наличия документов, предусмотренных международными договорами Российской Федерации;
- иных требований, предусмотренных морским законодательством.

Контроль осуществляется в виде исследования представленных документов и/или осмотра судов. Результаты заносятся инспектором в ИС, судну, в зависимости от его состояния, выдается в виде акта готовности судна к рейсу или не выдается в виде существенного несоответствия с кодом 30 разрешение на выход из порта. По результатам осмотров в зависимости от количества и значимости замечаний судну автоматически рассчитываются и присваиваются баллы риска, от которых в обратной зависимости определяется период между инспектированием.

Основной выходной продукцией ИС являются несоответствия, выявленные в ходе инспектирования и оформленные в виде акта. По результатам обнаруженных несоответствий инспектор ГПК может принимать меры административного характера, которые в ИСГС не вносятся.

Веб-сервис содержит историю инспекций с фильтрацией по периоду проверки, порту, судну и характеру несоответствий.

ИСГС является закрытой системой, пользователями являются Росморречфлот, Ространснадзор, Ростехнадзор. Обобщенные статистические данные по результатам инспектирования в виде ежегодных отчетов ГПК выкладываются для открытого доступа на сайте Росморречфлота [8].

7. Система регистрации судов

Система предназначена для использования Росморречфлотом и Ространснадзором в целях получения информации о количественном и качественном составе флота под флагом РФ, о тенденциях изменения его основных показателей, а также внесения, поиска и отображения информации по указанным судам

Система регистрации судов (СРС) представляет собой совокупность реестров капитана морского порта. ИС разработана в соответствии с

требованиями Правил государственной регистрации судов, эксплуатируемых под российским флагом [11].

По заявлению собственника или судовладельца судно регистрируется в одном из реестров судов РФ: в Государственном судовом реестре; в бербоут-чартерном реестре; в Российском международном реестре судов. Оператором веб-сервиса является Росморречфлот.

Ключевым звеном ИС является «судовое дело» с указанием данных по судну и его собственнику и/или судовладельцу.

Выходными данными системы являются:

- краткие построечные данные судна;
- идентификационный номер, присвоенный Международной морской организацией (номер ИМО) (при наличии);
- бортовой номер (для судов рыбопромыслового флота);
- год постройки;
- данные судовладельца и/или собственника.

Заполнение БД происходит в установленном законом порядке силами регистрационных отделов службы капитана порта.

Веб-сервис содержит систему фильтрации по портам регистрации, реестрам, судам, судовладельцам.

Для судов валовой вместимостью 500 и более, совершающих международные рейсы ведется Журнал непрерывной регистрации истории судна. Приложением предусмотрена формирование пакета сведений о судах и их владельцах и экспорта данных в ФНС РФ.

8. Модуль «Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации»

Веб-сервис «Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации» является модулем информационной системы государственного портового контроля и предназначен для получения информации о движении судов в российских морских портах.

Информация о заходе судна в порт или выходе из порта вносится в установленные законодательством сроки на основании заявки.

Ключевым звеном ИС является заявка, которая содержит необходимые сведения: даты, название судна ИМО номер, позывной в открытой части, судовую роль, описание груза и другие – в закрытой. Сервис имеет функцию фильтрации по судам, портам, временному диапазону, имеется возможность сортировки результатов поиска.

Основная функция – регистрация и учет судозаходов морских судов под флагом РФ в российские порты.

9. ФГИС по учету транспортных происшествий на морском и речном транспорте

Федеральная государственная ИС «По учету транспортных происшествий на морском и речном транспорте и выработке мер по их предупреждению в соответствии с функциями, возложенными на Ространснадзор, в связи с введением в обязательную силу Международного кодекса международных стандартов и рекомендуемой практики расследования аварий и инцидентов на море (приказ Минтранса России от 14.05.2009 № 75)» (АСУ ТП) запущена в эксплуатацию в 2011 году.

Для функционирования приложения используются возможности информационно-телекоммуникационной сети интернет.

Основное назначение системы - централизованный учет информации и материалов дел по расследованию транспортных происшествий на море и внутренних водных путях.

Оператором ИС является Федеральная служба по надзору в сфере транспорта.

Ключевым звеном информационной системы является аварийное дело.

Базу данных составляет Реестр транспортных происшествий и материалы дел по их расследованию.

Пользователи ресурса – инспекторы территориальных надзорных органов – в установленном законодательством порядке вносят в БД ИС сведения по расследованию транспортного происшествия (ТП). На основании результатов расследования инспекторами устанавливаются лица, причастные к ТП, делаются выводы и вырабатываются рекомендации для эксплуатантов судов по недопущению аварийности в будущем.

Непосредственного воздействия ФГИС АСУ ТП на судовладельцев или экипажи судов не оказывает.

Входной информацией в ИС являются аварийные дела, выходной – меры в виде рекомендаций или законодательных инициатив на основе статистического анализа транспортных происшествий.

10. Программный комплекс «НАДЗОР»

Программный комплекс «НАДЗОР» является сетевым корпоративным приложением, функционирующим на сервере территориального управления Ространснадзора, а именно – на базе ДВУ Госморнадзора. Приложение запущено в эксплуатацию в 2015 году. Комплекс предназначен для создания планов проверок в подконтрольной ТУ сфере, включая риск-ориентированное планирование [2].

Оператором ПК «НАДЗОР» является ДВУ Госморнадзора, пользователями приложения – инспекторы управления.

Входной информацией является:

- сведения о поднадзорном субъекте, включая реквизиты, эксплуатируемые объекты (суда, причалы);

- результаты проведенных мероприятий в отношении поднадзорных ЮЛ (плановые и внеплановые проверки, рейдовые осмотры, рассмотрение обращений граждан);

- сведения о лицензиях на виды деятельности в области торгового мореплавания на всех этапах от выдачи до прекращения;

- сведения о транспортных происшествиях на судах поднадзорных ЮЛ;

- результаты мониторинга государственных информационных систем на предмет соблюдения поднадзорными субъектами нормативных требований;

- административная практика в отношении подконтрольных ЮЛ, включая должностных лиц из числа берегового и судового персонала;

- сведения о любых нарушениях подконтрольной сферой обязательных нормативных требований в области торгового мореплавания.

Функционал ПК НАДЗОР:

- учет контрольно-надзорной деятельности (КНД) управления;

- ведение реестра поднадзорных субъектов;

- ведение реестра объектов (судов и причалов), эксплуатируемых поднадзорными субъектами;

- ведение реестра лицензий, выданных управлением;

- учет административной практики в подконтрольной сфере;

- учет надзорной нагрузки на бизнес;

- импорт реквизитов ЮЛ из БД ФНС;

- учет нарушений поднадзорными ЮЛ в области торгового мореплавания;

- присвоение на основе оперируемых данных поднадзорным субъектам категорий риска;

- формирование планов проверок с учетом категорий риска;

- выгрузка проектов планов в форматах для загрузки в АСМ и/или ЕРП.

Выходным продуктом приложения являются актуализированные по БД ФНС реестры субъектов с категориями риска, реестры проверок, объектов, аварийных случаев, а также планы проверок.

Таблица 1.

Основные характеристики информационных систем

Параметр	Информационные системы								
	АСМ	ЕРП	ЕРМСП	ЕГРЮЛ ЕГРИП	ИСГС	СРС	ССС	АСУ ТП	НАДЗОР
Реквизиты ЮЛ, ИП	+	+	+	+	-	+	-	-	+
Сведения о лицензиях	+	-	-	+	-	-	-	-	+
Административная практика	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Сведения о нарушениях БМ	-	-	-	-	+	-	-	-	+
Согласование плана	+	+	-	-	-	-	-	-	+
Учет риск-фактора	+	-	-	-	+	-	-	-	+
Автоматическое риск-категорирование	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Формирование плана	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Учет надзорной нагрузки на бизнес	+	+	-	-	-	-	-	-	+
Возможность работы в сети интернет	+	+	+	+	+	+	+	+	-

11. Сравнительные характеристики информационных систем

Характеристики информационных ресурсов рассматривались с учетом их применения в процессе управления безопасности мореплавания.

Сравнительные данные рассмотренных выше ИС приведены в таблице 1.

В таблице 1 помимо вышеупомянутых сокращений обозначено: ССС – система судозаходов или модуль «Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации».

Согласно таблице, наиболее полным функционалом обладает ПК НАДЗОР, недостатком которого является отсутствие возможности работать в телекоммуникационной сети интернет.

В таблице не приводятся параметры импорта/экспорта данных ИС между собой. Как следует из рассмотренных характеристик эти возможности слишком ограничены.

Отсутствие взаимодействия между ресурсами препятствует выработке целостного системного подхода к безопасности торгового мореплавания.

Так, получение в режиме реального времени риск-фактора и сведений о нарушениях из ИСГС в АСМ и НАДЗОР позволит применять предусмотренные законодательством РФ меры в отношении судовладельца, эксплуатирующего судно с предпосылками к аварии.

Информация о количестве протоколов, составленных капитаном морского порта (ресурс отсутствует) напрямую влияет на категорию риска, присваиваемую Ространснадзором, отсутствие ее в ПК НАДЗОР при осуществлении категорирования может исказить риск-фактор компании.

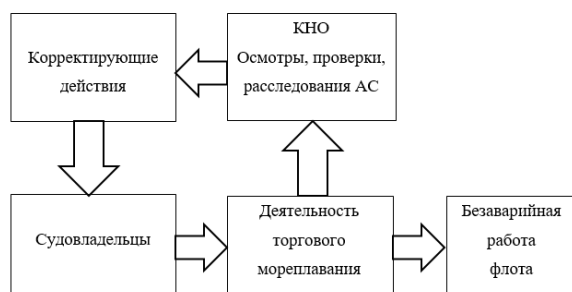


Рис. 3. Блок-схема петли качества

Разработка петли качества не входит в рамки данной статьи, являясь. Однако, одним из

перспективных направлений повышения безопасности мореплавания.

Данное обстоятельство, в свою очередь, приводит к невозможности создать «петлю качества» для минимизации рисков при эксплуатации флота (рис. 3).

Для функционирования такой петли необходимо, чтобы по результатам деятельности контрольно-надзорных органов (КНО) формировались корректирующие воздействия на судовладельца с целью устранения несоответствий и повышения качества торгового мореплавания.

Заключение

Таким образом по результатам анализа действующих морских ИС можно сделать выводы:

- в морской отрасли разработано достаточное количество информационных приложений для решения конкретных задач;
- большинство рассмотренных ресурсов являются «вещью в себе»;
- уровень обмена данными в режиме реального времени крайне низкий или совсем отсутствует;
- степень интеграции действующих ресурсов не позволяет на системном уровне управлять рисками;
- рассмотренные ИС содержат компоненты, необходимые для создания системы управления рисками (СУР).

Для повышения безопасности торгового мореплавания представляются перспективными следующие подходы:

- создание в рамках исполнения Программы цифровизации [1] информационно-телекоммуникационной платформы, обеспечивающей на единой основе взаимодействие в режиме реального времени как существующих, так и вновь разрабатываемых ресурсов;
- формирование исследовательских компетенций и новых технических заделов в области торгового мореплавания;
- исследование риск-фактор компании-судовладельца в зависимости от установленного ИСГС риск-фактора эксплуатируемых судов на предмет установления зависимости аварий от предшествующих нарушений судном требований безопасности мореплавания.

В качестве реальной модели можно рассматривать ПК НАДЗОР, алгоритмы которого позволяют в автоматическом режиме формировать риск-ориентированный план и присваивать категории риска.

Литература

1. Цифровая экономика Российской Федерации [Текст]: Распоряжение Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р // Собрание законодательства Российской Федерации от 2017 г. N 32. ст. 5138
2. Оловянных, А. Л. Программный комплекс Дальневосточного управления государственного морского надзора федеральной службы по надзору в сфере транспорта [Текст] / И. П. Турищев, А. Л. Оловянных, М. В. Гомзяков, О. В. Москаленко // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Пленарные доклады одиннадцатой международной научно-практической конференции. 2–4 октября 2015 г. – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2015. – 68 с.
3. ФГИС Единый Реестр проверок [Портал]: Генеральная прокуратура РФ– Режим доступа: – <https://proverka.gov.ru/>
4. О внедрении автоматизированной системы мониторинга и формирования аналитических отчетов о деятельности Федеральной службы по надзору в сфере транспорта [Электронный ресурс]: приказ Минтранса РФ от 24 декабря 2010 года N ГК-1407фс // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: – <http://docs.cntd.ru/document/902257772>

5. Единый реестр субъектов среднего и малого предпринимательства [Портал ФНС]: Федеральная налоговая служба. – Режим доступа: – <https://rmsp.nalog.ru/>
6. Предоставление сведений из ЕГРЮЛ/ЕГРИП [Портал ФНС]: Федеральная налоговая служба. – Режим доступа: – <https://egrul.nalog.ru/index.html>
7. Кодекс торгового мореплавания [Электронный ресурс] // Система Гарант. – Режим доступа: – <http://base.garant.ru/12115482/>
8. Годовые отчеты ГПК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/morskoy_flot/gosudarstvennyy_portovyy_kontrol/godovye_otchetyi_gpk_v_rf.html
9. Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации. /Информационная система государственного портового контроля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://fsc.marinet.ru/?action=logout>
10. Информационная система госконтроля судов, оперирующих под российским флагом ИСГС [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://fsc.marinet.ru/> – (Дата обращения 01.05.2019).
11. Правила государственной регистрации судов, прав на них и сделок с ними в морских портах и централизованного учета судов [Электронный ресурс] : приказ Минтранса РФ от 19 мая 2017 №191 // Кодификация РФ. – Режим доступа: – <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-19.05.2017-N-191/>

References

1. Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii [The Digital Economy of the Russian Federation]: Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-р // Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii ot 2017 g. N 32. st. 5138
2. Olovyannikov, A. L. Programmnyj kompleks Dal'nevostochnogo upravleniya gosudarstvennogo morskogo nadzora federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere transporta [The software package of the Far East Directorate for State Maritime Supervision] / I. P. Turishchev, A. L. Olovyannikov, M. V. Gomzyakov, O. V. Moskalenko // Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Plenarnye doklady odinnadcatoj mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoj konferencii. 2–4 oktyabrya 2015 g. – Vladivostok: DVO Rossijskoj Akademii transporta, 2015. – 68 s.
3. FGIS Edinyj Reestr proverok [The Unified Register of Audit] : General'naya prokuratura RF– URL: – <https://proverki.gov.ru/>
4. vnedrenii avtomatizirovannoj sistemy monitoringa i formirovaniya analiticheskikh otchetov o deyatelnosti Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere transporta [On the introduction of an automated system for monitoring and generating analytical reports on the activities of the Federal Transport Supervision Service] :prikaz Mintransa RF ot 24 dekabrya 2010 goda N GK-1407fs // Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii. – Rezhim dostupa: – <http://docs.cntd.ru/document/902257772>
5. Edinyj reestr sub"ektov srednego i malogo predprinimatel'stva [The Unified Register of medium and small businesses]: Federal'naya nalogovaya sluzhba. – Rezhim dostupa: – <https://rmsp.nalog.ru/>
6. Predostavlenie svedenij iz EGRYUL/EGRIP [Providing information from the Federal Tax Service]: Federal'naya nalogovaya sluzhba.– Rezhim dostupa: – <https://egrul.nalog.ru/index.html>
7. Kodeks torgovogo moreplavaniya [Merchant Shipping Code] // Sistema Garant. – Rezhim dostupa: – <http://base.garant.ru/12115482/>
8. Godovye otchety GPK [Annual port control reports]. – Rezhim dostupa: – http://www.morflot.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/morskoy_flot/gosudarstvennyy_portovyy_kontrol/godovye_otchetyi_gpk_v_rf.html
9. Registraciya zahodov i othodov sudov v morskikh portah Rossijskoj Federacii. /Informacionnaya sistema gosudarstvennogo portovogo kontrolya. [Portcall of the Russian Federation]. – Rezhim dostupa – <https://fsc.marinet.ru/?action=logout>
10. Informacionnaya sistema goskontrolya sudov, operiruyushchih pod rossijskim flagom ISGS [Information system of state control of ships operating under the Russian flag]. – Rezhim dostupa – <https://fsc.marinet.ru/> – (Dataobrashcheniya 01.05.2019).
11. Pravila gosudarstvennoj registracii sudov, prav na nih i sdelok s nimi v morskikh portah i centralizovannogo ucheta sudov [Rules for state registration of ships, rights to them and transactions with them in seaports and centralized registration of ships]:prikaz Mintransa RF ot 19 maya 2017 №191 // Kodifikaciya RF. – Rezhim dostupa: – <https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Mintransa-Rossii-ot-19.05.2017-N-191>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Владимирович Гомзяков кандидат технических наук, доцент, начальник отдела надзора за мореплаванием, Дальневосточное управление государственного морского надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта 690003, Владивосток, ул. Нижнепортовая, 3.
e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru

Анатолий Николаевич Соболенко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовые двигатели внутреннего сгорания, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail:sobolenko_a@mail.ru, тел.: 8(950)286-57-03

Mihail V. Gomzyakov, Ph.D. (Eng), associate professor, the chief of the Department of supervision over the navigation the Far East Directorate for State of Maritime Supervision Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport, Nizhneportovaya, 3, Vladivostok, 690003, Russian Federation, e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru Ph.: 8(904)522-53-19

Anatoly N. Sobolenko, Professor, Dr.Sci.(Eng.), Professor of the Department of ship power installations, Maritime State University, Verhneportovay, 50a, Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: sobolenko_a@mail.ru, ph.: 8(950)286-57-03

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.082

УДК 656.615

Определение оптимального числа причалов в порту

А.А. Луговец¹, А.Д. Сироткин², Л.В. Терентьева¹, А.А. Фунтусов¹¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, ²АО "Торговый порт Посьет"

Аннотация Определение числа грузовых причалов является одной из основных задач, решаемых при проектировании морских терминалов. Согласно Нормам технологического проектирования морских портов, потребное число грузовых причалов определяется в зависимости от грузооборота порта, месячной пропускной способности и коэффициента занятости причала. Для контейнерных терминалов значение коэффициента занятости причала рекомендуется принимать равным 0,4-0,5. В статье показано, что такой подход к определению оптимального числа причалов является не вполне корректным и может приводить к существенным просчетам. В статье рассматривается более корректный метод решения задачи с применением методов теории массового обслуживания. В качестве критерия оптимальности используется комплексный оценочный показатель – минимальные суммарные издержки вследствие простоев судов и причалов.

Ключевые слова: морской порт, причал, оптимальная занятость, теория массового обслуживания, поток судов

Determination of optimal number of berths in a seaport

Aleksandr A. Lugovets¹, Artem D. Sirotkin², Liubov V. Terenteva¹, Anatoliy A. Funtusov¹¹Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, ²Commercial Port of Posiet

Abstract. Number of berths is one of the key parameters in the design of a port terminal. The Guidelines for the design of seaports approved by the Ministry of Transport suggest that the number of berths should be determined using a formula which is based mainly on the cargo throughput, the ship loading (discharging) rate and the berth occupancy factor. For container terminals the recommended value of the berth occupancy factor is 0.4-0.5. The aim of this article is to show that such approach to determining the optimum number of berths in a seaport can be quite misleading because it ignores the fact that optimum berth utilization is dependent on a number of various factors and can vary over a very wide range. A more accurate queueing-theory-based approach to determining the optimum number of berths is proposed.

Keywords: seaport, berth, optimal utilization, queuing theory, vessel port call

Введение

Определение потребного числа грузовых причалов является одной из основных задач, решаемых не только при проектировании новых, но и при эксплуатации уже существующих морских терминалов для определения их доступной мощности.

Согласно утвержденным Минтрансом России Нормам технологического проектирования морских портов (НТП) [1], потребное число грузовых причалов определяется по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{мес}}}{30M_{\text{сут}}K_{\text{мет}}K_{\text{зан}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{мес}}$ – грузооборот причалов в месяц наибольшей нагрузки (т/мес. или конт./мес. для контейнерного терминала);

$M_{\text{сут}}$ – валовая интенсивность грузовых работ при обработке расчетных типов судов (т/сут. или конт./сут.);

$K_{\text{мет}}$ – коэффициент использования бюджета рабочего времени причала, учитывающий простои причала по метеорологическим факторам в месяц наибольшей нагрузки;

$K_{\text{зан}}$ – коэффициент занятости причала обработкой судов.

При определении потребного числа причалов по формуле (1) ключевое значение имеет коэффициент занятости причалов обработкой судов. Данный коэффициент предусматривает создание

определенного резерва производственной мощности терминала с целью ограничения средней длины очереди и среднего времени простоя судов в ожидании обработки. Создание такого резерва приводит к увеличению потребного числа причалов и, как следствие, – к увеличению затрат на строительство и последующую эксплуатацию морского терминала.

В отличие от планового грузооборота и других параметров, входящих в формулу (1), коэффициент занятости причала не может быть определен однозначно исходя из объективных физических данных. Перед проектировщиком естественным образом встает вопрос: каково рациональное (оптимальное) значение величины $K_{\text{зан}}$, которое следует использовать при определении потребного числа причалов?

Согласно НТП, коэффициент занятости причалов обработкой судов рекомендуется принимать равным 0,6-0,7 – для универсальных терминалов, 0,5-0,6 – для специализированных терминалов для навалочных и насыпных грузов, 0,45-0,55 – для терминалов для наливных грузов, 0,4-0,5 – для контейнерных терминалов.

Таким образом, НТП предлагают определять значение коэффициента занятости причалов только исходя из специализации проектируемого морского терминала, не раскрывая для проектировщика причин выбора именно таких рекомендованных значений и тем самым оставляя за скобками ряд существенных факторов, которые необходимо учитывать при выборе коэффициента занятости и определении потребного числа причалов.

По мнению авторов настоящей статьи, в современных условиях эксплуатации портов и флота такой подход является слишком упрощенным даже при выполнении грубых предварительных расчетов.

В статье раскрывается метод определения оптимального числа причалов и рекомендованных значений коэффициента занятости причалов. На основе этого метода даются рекомендации по переработке и дополнению соответствующих разделов Норм технологического проектирования морских портов.

Метод определения оптимального числа причалов

Методика решения задачи об определении оптимального числа причалов сводится к тому, чтобы для каждого из выбранных значений числа причалов рассчитать затраты по порту за время простоя причалов из-за отсутствия судов и затраты по флоту за время ожидания причала [2, 4]. Минимальное значение суммарных приведенных затрат по комплексу «порт-флот» и будет соответствовать оптимальному числу причалов.

Очевидно, что при одном и том же грузообороте порта с увеличением числа n причалов все большее и большее число причалов будет непроизводительно простаивать. Среднесуточные убытки порта вследствие простоя причалов будут равны

$$R_{\Pi}(n) = mU_{\Pi}, \quad (2)$$

где m – среднее число простаивающих причалов;
 U_{Π} – средние убытки порта за сутки простоя одного причала.

С другой стороны, при увеличении числа причалов средняя длина очереди и среднее время простоя судов на рейде в ожидании обработки будут уменьшаться. Соответственно, будут уменьшаться и убытки флота, связанные с простоями судов. При данном числе n причалов среднесуточные убытки флота вследствие простоев судов в ожидании обработки будут равны

$$R_{\Phi}(n) = LU_{\Phi}, \quad (3)$$

где L – среднее число судов, стоящих на рейде порта в ожидании освобождения причала;
 U_{Φ} – средние убытки флота за сутки простоя одного судна.

При заданных характеристиках грузо- и судопотока оптимальным будет являться такое число причалов, при котором суммарные затраты по порту и флоту будут минимальными:

$$Z = R_{\Pi}(n) + R_{\Phi}(n) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Описанный подход к определению оптимального числа причалов предполагает, что и флот, и морской терминал находятся в руках одного и того же оператора, т. е. расходы флота и расходы порта оплачиваются «из одного кошелька». Однако этот подход может быть применен и в том случае, когда порт и флот являются самостоятельными, независимыми предприятиями. Для этого необходимо придать величине $R_{\Phi}(n)$ и критерию оптимальности Z несколько иной смысл, который

будет зависеть от того, несет ли порт ответственность за простои судов в ожидании обработки или нет.

Если коммерческие условия обработки судов в порту будут предусматривать такую ответственность (что является стандартным условием договора стивидорного и терминального обслуживания между оператором терминала и морским линейным перевозчиком), то величина U_{Φ} в формуле (3) должна определяться как величина штрафа за сутки простоя судна в ожидании постановки к причалу. При этом величина $R_{\Phi}(n)$ приобретает другой смысл: она определяет среднесуточные расходы порта на оплату штрафов за задержку судов на рейде в ожидании обработки. Соответственно, критерий оптимальности Z в формуле (4) следует понимать как суммарные убытки порта с учетом убытков от простоя причалов и штрафов за простои судов в ожидании обработки.

Если же порт не будет нести ответственность за простои судов в ожидании обработки, то величину $R_{\Phi}(n)$ в формуле (4) следует рассматривать как упущенную выгоду порта. Очевидно, что если средняя длина L очереди судов в порту и, соответственно, среднее время простоя судов в ожидании обработки будет слишком велики, то клиенты порта могут отказаться от его услуг. Это означает не только потерю грузовой базы, но и потерю репутации порта в глазах потребителей портовых услуг. К сожалению, однозначно определить величину этих потерь в зависимости от величины L очень трудно. Для этого, очевидно, следует использовать методы маркетинга на основе анализа конкурентной среды порта.

Определение величины m

Для определения величин m и L , необходимых для расчета оптимального числа причалов по описанной выше методике, необходимо прибегнуть к методам теории очередей (теории массового обслуживания – ТМО).

С точки зрения ТМО морской терминал можно рассматривать как систему массового обслуживания (СМО) с неограниченным ожиданием. На вход системы поступает случайный поток равноправных требований на обслуживание – морских судов. Причалы терминала представляют собой обслуживающие устройства (каналы обслуживания). Если в момент прибытия очередного судна все причалы заняты, то судно становится на рейде и ожидает освобождения причала.

Что касается среднего числа m незанятых причалов, то его зависимость от общего числа n причалов в порту имеет следующий простой вид:

$$m = n - \rho, \quad (5)$$

где ρ – среднее число причалов, одновременно занятых обработкой судов.

В ТМО доказывается, что в любой СМО с неограниченным ожиданием среднее число каналов обслуживания, одновременно занятых обслуживанием заявок, равно

$$\rho = \lambda t, \quad (6)$$

где λ – интенсивность потока заявок (среднее число заявок, поступающее в систему за единицу времени); τ – средняя продолжительность обслуживания заявки.

При расчете потребного числа причалов величина λ может быть найдена по формуле

$$\lambda = \frac{Q}{DT}, \quad (7)$$

где Q – расчетный грузооборот порта;
 D – грузоподъемность расчетного судна;
 T – плановый период.

Величина τ средней продолжительности обработки судна в порту может быть рассчитана исходя из грузоподъемности расчетного судна и плановой судо-суточной нормы M обработки судна по формуле

$$\tau = \frac{D}{M}. \quad (8)$$

Подставив формулы (7) и (8) в формулу (6), получим, что

$$\rho = \frac{Q}{TM}. \quad (9)$$

Определение величины L

Для определения среднего числа L судов, стоящих в очереди на рейде порта в ожидании обработки, необходимо знать закон распределения интервала времени между моментами прибытия судов в порт, а также закон распределения продолжительности обработки судов в порту.

В ТМО очень важную роль играет так называемый простейший (пуассоновский) поток событий [3]. Это связано с тем, что во многих реальных СМО поток заявок, поступающих в систему, является простейшим. В простейшем потоке интервал времени между моментами поступления заявок распределен по показательному (экспоненциальному) закону с функцией распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где λ – интенсивность потока заявок.

Для того чтобы проверить, является ли поток судов, прибывающих в порт, простейшим (пуассоновским), Сироткиным А. Д. был исследован поток судов, прибывающих к одному из контейнерных терминалов порта Владивосток. Для этого были проанализированы данные о времени прибытия к терминалу 239 судов в период с 08.04.2017 г. по 02.03.2018 г. На основании этих данных были рассчитаны значения статистической функции $F^*(t)$ распределения интервала времени t между судозаходами (таблица 1). По формуле (10) были также вычислены соответствующие значения теоретической функции $F(t)$ распределения интервала (таблица 2).

Сравнение данных таблицы 1 и таблицы 2 для одних и тех же значений t показывает, что распределение интервала времени между моментами прибытия судов в порт действительно хорошо согласуется с показательным законом (10).

Таким образом, предположение о том, что поток судов, прибывающих в порт, является простейшим (пуассоновским), можно считать весьма правдоподобным. Проверка с помощью критерия согласия Пирсона подтверждает это предположение при уровне значимости 0,01.

Таблица 1

Статистическая функция распределения интервала времени между судозаходами

t, сут.	F*(t)	t, сут.	F*(t)
0,5	0,2803	5,5	0,9916
1,0	0,5230	6,0	0,9916
1,5	0,6695	6,5	0,9958
2,0	0,7490	7,0	0,9958
2,5	0,8410	7,5	0,9958
3,0	0,8996	8,0	0,9958
3,5	0,9331	8,5	0,9958
4,0	0,9749	9,0	0,9958
4,5	0,9874	9,5	1,0000
5,0	0,9874		

Таблица 2

Теоретическая функция распределения интервала времени между судозаходами (показательный закон распределения)

t, сут.	F(t)	t, сут.	F(t)
0,5	0,3064	5,5	0,9821
1,0	0,5190	6,0	0,9876
1,5	0,6664	6,5	0,9914
2,0	0,7686	7,0	0,9940
2,5	0,8395	7,5	0,9959
3,0	0,8887	8,0	0,9971
3,5	0,9228	8,5	0,9980
4,0	0,9465	9,0	0,9986
4,5	0,9629	9,5	0,9990
5,0	0,9742		

Для того чтобы определить закон распределения времени обработки судов в порту, Сироткиным А. Д. были проанализированы данные о фактическом времени обработки 187 судов на упомянутом выше контейнерном терминале порта Владивосток. На основании этих данных были рассчитаны значения статистической функции распределения времени обработки судна на терминале (таблица 3).

Данные таблицы 3 были сопоставлены с несколькими известными законами распределения непрерывных случайных величин, в том числе – с показательным (экспоненциальным) законом (10). В результате такого сопоставления оказалось, что данные таблицы 3 лучше всего согласуются с законом распределения Эрланга 3-го порядка. Его функция распределения имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - \sum_{k=0}^2 \frac{(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t}, \quad (11)$$

где $\mu = 3/\tau$ (τ – средняя продолжительность обработки судна). Значения функции (11) представлены в таблице 4.

Таблица 3

Статистическая функция распределения продолжительности обработки судна

t, сут.	F*(t)	t, сут.	F*(t)
0,5	0,0749	2,5	0,8877
1,0	0,3048	3,0	0,9626
1,5	0,5027	3,5	0,9786
2,0	0,7273	4,0	1,0000

Таблица 4

Теоретическая функция распределения продолжительности обработки судна (закон распределения Эрланга 3-го порядка)

t, сут.	F*(t)	t, сут.	F*(t)
0,5	0,0815	2,5	0,8781
1,0	0,3268	3,0	0,9397
1,5	0,5812	3,5	0,9714
2,0	0,7657	4,0	0,9868

На основании приведенных выше расчетов, при определении величины L и требуемого числа причалов морской терминал можно приближенно рассматривать как СМО типа $M/E_3/n$.

С помощью одной из программ имитационного моделирования систем массового обслуживания может быть рассчитана средняя длина L очереди судов в порту для разных значений числа причалов (n), интенсивности судопотока (λ) и средней продолжительности обработки судна (τ). Результаты расчетов могут быть представлены в Нормах технологического проектирования морских портов в виде таблиц или номограмм.

Последний способ более предпочтителен в силу его компактности. Следует отметить, что при заданном числе каналов обслуживания средняя длина очереди в системе зависит от произведения величин λ и τ (т. е. от величины ρ), а не от λ и τ по отдельности. Поэтому номограмма для определения величины L может иметь довольно простой вид, показанный на рис. 1 [5].

На номограмме по оси абсцисс откладываются значения величины ρ/n , которая представляет собой не что иное, как коэффициент занятости причалов порта. По оси ординат откладываются значения величины L/ρ . Кривые линии соответствуют разному числу причалов в порту.

Рассчитав предварительно значение ρ по формуле (9), проектировщик может для любого числа n причалов порта рассчитать величину ρ/n . Отложив ее по горизонтальной оси, для данного числа причалов на вертикальной оси номограммы легко найти величину L/ρ . Умножив эту последнюю на ρ , получим искомое значение средней длины очереди L .

Следует отметить, что в любой СМО с неограниченным ожиданием отношение ρ/n (коэффициент занятости каналов обслуживания) обязательно должно быть меньше 1. В противном случае в системе будет возникать бесконечная очередь. Поэтому вариационный ряд числа причалов в порту должен начинаться с наименьшего целого числа, превышающего величину ρ .

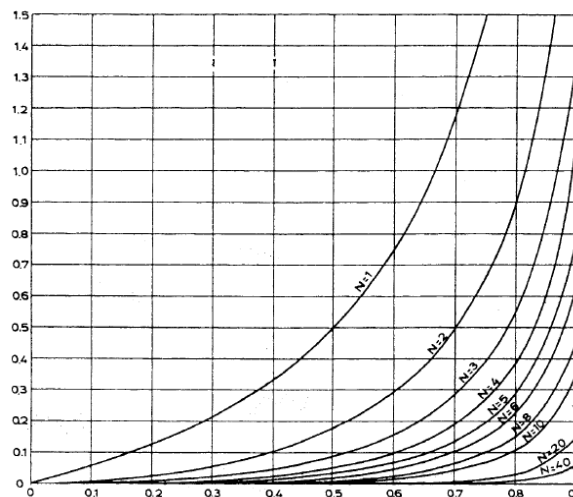


Рис. 1. Номограмма для определения величины L

Заключение

Методика определения требуемого числа грузовых причалов, изложенная в Нормах технологического проектирования морских портов [1], имеет существенные недостатки. Основной недостаток состоит в том, что она не раскрывает принцип определения оптимального числа причалов в порту, оставляя за скобками ряд существенных факторов, которые необходимо учитывать при решении этой задачи.

Представляется целесообразным существенно дополнить и переработать раздел Г1 приложения Г Норм технологического проектирования морских портов, в котором излагается методика определения потребности в причалах.

Прежде всего, в указанном разделе должно быть сделано разграничение между тремя вариантами расчета требуемого числа причалов.

Первый вариант должен предусматривать, что оператор проектируемого морского терминала будет одновременно являться и оператором (или фрахтователем) флота, обслуживаемого этим терминалом.

Второй вариант должен предусматривать, что оператор терминала не будет аффилирован с операторами или фрахтователями флота, обслуживаемого терминалом, однако условия обработки судов в порту будут предусматривать ответственность терминала за простои судов в ожидании обработки.

Наконец, третий вариант должен предусматривать, что оператор терминала не будет аффилирован с операторами флота и не будет связан с ними какими-либо обязательствами относительно продолжительности стоянки судов в порту.

Далее расчет требуемого числа причалов должен выполняться в следующем порядке.

1. По формуле (9) рассчитать среднее число ρ причалов, одновременно занятых обработкой судов.

2. Составить вариационный ряд числа причалов в порту, начиная с наименьшего целого числа, большего ρ .

3. По формуле (5) для каждого числа причалов из вариационного ряда рассчитать среднее число m свободных (незанятых) причалов в порту.

4. По формуле (2) для каждого числа причалов из вариационного ряда рассчитать среднесуточные убытки порта вследствие непроизводительного простоя причалов.

5. По таблицам или номограммам (рис.1) для каждого числа причалов из вариационного ряда определить среднюю длину L очереди судов, стоящих на рейде в ожидании начала обработки.

6. Для каждого числа причалов из вариационного ряда определить величину $R_{\phi}(n)$. В первом и втором вариантах расчета величина $R_{\phi}(n)$ должна определяться по формуле (3). При этом в первом варианте расчета под U_{ϕ} следует понимать среднесуточные убытки от простоя одного судна, а во втором варианте – размер штрафа за сутки задержки судна в ожидании начала обработки. В третьем варианте расчета величина $R_{\phi}(n)$ должна определяться методом экспертных оценок исходя из анализа конкурентной среды порта.

7. По формуле (4) для каждого числа причалов из вариационного ряда рассчитать величину критерия оптимальности Z .

8. Определить число причалов, при котором критерий оптимальности Z принимает наименьшее значение.

Литература

1. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 226 с.
2. Брюм А. И. Технологическое проектирование морских портов. М.: Транспорт, 1971. 328 с.
3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
4. Гнеденко Б. В., Зубков М. Н. Об определении оптимального числа причалов // Морской сборник. 1964. № 6. С. 22-39.
5. Agerschou, H., Dand, I., Torben, E., et al. Planning and design of ports and marine terminals. 2nd edition. Thomas Telford Publishing. 2004. 444 p.

References

1. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Guidelines for technological design of seaports]. M. Standartinform, 2018. 226 p.
2. Bryum, A.I. Tekhnologicheskoe proektirovanie morskikh portov [Technological design of seaports]. M. Transport, 1971. 328 p.
3. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnykh sistem [Modeling complex systems]. M. Nauka, 1968. 356 p.
4. Gnedenko B.V., Zubkov M.N. Ob opredelenii optimal'nogo chisla prichalov [Determination of optimal number of berths]. Morskoy sbornik. 1964. № 6, pp. 22-39.
5. Agerschou, H., Dand, I., Torben, E., et al. Planning and design of ports and marine terminals. 2nd edition. Thomas Telford Publishing. 2004. 444 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Анатольевич Луговец, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры управления морским транспортом, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: alal@list.ru

Aleksandr A. Lugovets, Dr. Sci. (Econ), Professor of the Maritime Management Department, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya St. 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: alal@list.ru

Артем Дмитриевич Сироткин, диспетчер по железнодорожным операциям, АО "Торговый порт Посьет", 692705, Приморский край, п.г.т. Посьет, ул. Портовая, д. 41, e-mail: artem_sirotkin_97@mail.ru

Artem D. Sirotkin, rail operations manager, Commercial Port of Posiet, Portovaya St. 41, Posiet 692705, Russian Federation, e-mail: artem_sirotkin_97@mail.ru

Любовь Васильевна Терентьева, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры управления морским транспортом, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: terenteva@msun.ru

Liubov V. Terenteva, Ph.D. (Eng), Associate professor of the Maritime Management Department, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya St. 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: terenteva@msun.ru

Анатолий Анатольевич Фунтусов, кандидат технических наук, доцент кафедры управления морским транспортом, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: ilim81@yandex.ru

Anatoliy A. Funtusov, Ph.D. (Eng), Associate professor of the Maritime Management Department, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Verhneportovaya St. 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation, e-mail: ilim81@yandex.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.084

УДК 332.199

Рыбопромышленный кластер: коэффициентный методический подход к оценке потенциала и возможности формирования на Дальнем Востоке России

А.И. Фисенко¹, М.А. Салтыков²¹Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, ²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Одним из важных вопросов перспективного социально-экономического развития Дальнего Востока Российской Федерации является вопрос о принципах, направлениях и приоритетах формирования и эффективности деятельности рыбопромышленных кластеров, позволяющих активно развивать современные морские технологии, рационально осваивать имеющиеся биоресурсы, внедрять прогрессивные инновационные механизмы и технологии современного производства, экономики и управления.

Целью настоящей работы является разработка методического подхода к оценке потенциала формирования рыбопромышленных кластеров в дальневосточных регионах страны на основе метода расчёта уровня локализации производства. Авторами предложен алгоритм оценки, основанный на расчёте и анализе коэффициентов плотности и специализации действующих в регионе предприятий и организаций рыболовства и рыбоводства, а также предложен интегральный коэффициент локализации рыбной промышленности, позволяющий оценить потенциал субъектов федерации Дальневосточного федерального округа для формирования в их хозяйственной структуре кластеров рыбной промышленности. На основании проведённого исследования построен рейтинг дальневосточных регионов, позволяющий определить наиболее перспективный из них по возможности формирования на его территории эффективного и конкурентоспособного рыбопромышленного кластера.

Ключевые слова: рыбопромышленный кластер, кластерная политика, интегральный коэффициент локализации рыбной промышленности, территориальная организация промышленности, рыбоводство, рыболовство.

Fishing cluster: coefficient methodical approach to assessment potential and the possibility of formation in the Russian Far East

Andrei I. Fisenko¹, Maksim A. Saltykov²¹Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy²Far East State Technical Fisheries University

Abstract One of the important issues promising the Russian Federation Far East's social and economic development is the principal direction and priority of the fishing clusters activities formation, which allows developing modern marine technologies, actively, rationally developing available biological resources, and introducing progressive innovative modern production's economy and management mechanisms and technologies.

The objective of the paper is to assess the process and the fishing clusters formation's potential in the Far East Federal District. At the research, the fishing clusters scheme in the Far East region was drawn up; the methodological recommendations for assessing clustering in the fishing industry potential on the basis of coefficients were proposed. Authors offered assessment algorithm which is based on specialization coefficients analysis fishery enterprises and fish breeding operating in the region. At the conclusion, authors offered the integrated localization coefficient for estimate the economy potential for formation fishing clusters at different regions of Russian Far East. The research allows to rate the potential of Far Eastern regions to creating effective and competitive fishing clusters.

Key words: fishing cluster, cluster policy, localization coefficient, fishing industry, territorial organization of the industry, fish breeding, fishery.

Введение

С середины 2000-х годов при обсуждении стратегии развития рыбной промышленности российского Дальнего Востока все чаще стал обсуждаться кластерный подход, описанный во многих работах западных экономистов, в частности, Портера М. [1, 2], Бергмана Э. и Фезера Э. [3], Энрайта М. [4], получивший затем распространение и в российской практике.

Целью создания и функционирования кластеров, с точки зрения указанных специалистов, должны были стать разработка и реализация новых инвестиционных проектов, создание устойчивых связей между местной властью, различными производителями, наукой, образованием, бытовыми организациями, а также повышение

технологичности отрасли, рост производительности труда и конкурентоспособности продукции.

Термин «кластер» (от англ. «cluster» – группа, гроздь, пучок) обозначает скопление, локализацию объектов, изначально применялся в математике для анализа массивов информации, дальнейшее распространение получил в методах кластерного анализа. Позже он стал применяться в других науках, в том числе в исследованиях территориальной и пространственной экономики, экономики предприятий и организаций и др. По нашему мнению, данный термин в экономике имеет достаточно широкую трактовку, и под кластером может пониматься статистическое скопление однородных экономических субъектов – промышленных предприятий, малых и средних компаний на территории. В качестве одного из признанных,

классических определений можно привести определение Майкла Портера: «Кластер – это географически локализованная группа взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере и характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга» [1]. Существует и множество других определений [см., например, 4; 5, с. 240].

Нужно отметить, что многие исследователи считают, что кластеры являются малыми инновационными системами, обеспечивающими обмен технологий. Преимуществом политики кластеризации является акцент на стимулировании инновационного развития и наличие синергетического эффекта для компаний, образующих кластер, а также мультипликативного эффекта для экономики региона. Географическая близость организаций, входящих в кластер обуславливает экономию использования научной и технологической инфраструктуры, потенциал технологических и производственных альянсов для взаимного повышения конкурентоспособности компаний [1, 4].

В качестве примера кластера можно привести сформированный на базе судостроительной отрасли Республики Корея комплекс взаимосвязанных отраслей, отдельных производств и услуг, который включает в себя около 300 заводов, в т. ч. и одного из мировых лидеров промышленного производства – холдинг Hyundai Heavy Industries (HHI). Заводы, работающие в судостроительном кластере Республики Корея, занимаются производством металла, двигателей, производством морского и промышленного оборудования, красок, спецодежды и др. Так, например, в 2017 г. заказы на строительство судов в HHI только по трём её трех судостроительным подразделениям составили 11,2 млрд долл. США. В производственной сфере компании, а также НИОКР, менеджменте и обслуживании занято около 16 тыс. чел. [6]. Основой кластера является сталелитейная промышленность, тяжёлое и точное машиностроение, соответствующая этим отраслям инфраструктура, включающая научно-исследовательские центры, университеты, готовящие инженеров-судостроителей, и другие отрасли и сферы национальной экономики [7].

Проведённое нами ранее исследование [8] межотраслевого рыбопромышленного комплекса Дальневосточного федерального округа (ДФО), показало, что существуют хорошие предпосылки и условия для процесса его кластеризации в целях повышения конкурентоспособности отрасли, её развития, модернизации рыбных портов и холодильных мощностей, специализированных терминалов, повышения эффективности судоремонта, внедрения технологий и инноваций в отрасль, создания современной логистической системы доставки продукции, кооперации смежных пищевых производств, повышения уровня научно-образовательного обеспечения и привлечения инвесторов в отрасль.

Сегодня на территории ДФО работает 2754 предприятия рыболовства, 197 предприятий рыбоводства (специализирующиеся на производстве моллюсков, водорослей); 1386 предприятий,

относящихся к субъектам малого предпринимательства, занимающихся как рыболовством, так и рыбоводством; 449 чел. индивидуальных предпринимателей [10]; 67 рыбоводных заводов, из которых 44 расположены в Сахалинской области, 10 – в Хабаровском крае, 4 – в Приморском крае, 4 – в Магаданской области, 5 – в Камчатском крае [11]. В регионе расположено мучное и кормовое производство, судостроительные и судоремонтные предприятия, морское машиностроение и приборостроение, роботостроение, проектирование, научные и образовательные учреждения: Тихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Инженерная школа Дальневосточного федерального университета. В отрасли также работают технологические компании, занимающиеся морскими инженерными технологиями, такие как: ООО «Технологическое оборудование», АО «Дальрыбтехцентр», ОАО «Дальреммаш» и другие.

Предприятия и организации рыбной промышленности географически располагаются в большинстве субъектов ДФО, при этом их основное число находится в Камчатском, Приморском и Хабаровском краях, Сахалинской и Магаданской областях, незначительная часть работает в Республике Саха-Якутия (рис. 1).

Удельный вес ДФО в общем объёме производства рыбы живой, свежей и охлажденной в целом по РФ в 2017 году составил 80%, а его доля в производстве рыбы и рыбопродуктов, в т. ч. консервированных составила 59% [10, с. 29]. По нашим расчетам, сегодня доля предприятий рыбной промышленности субъектов ДФО (по вылову) составляет около 70% всех российских предприятий. Они же являются и основными экспортёрами рыбы и морепродуктов на рынки стран АТР, прежде всего, в КНР, Южную Корею, Японию и другие страны Восточной и Юго-Восточной Азии [10, с. 27].

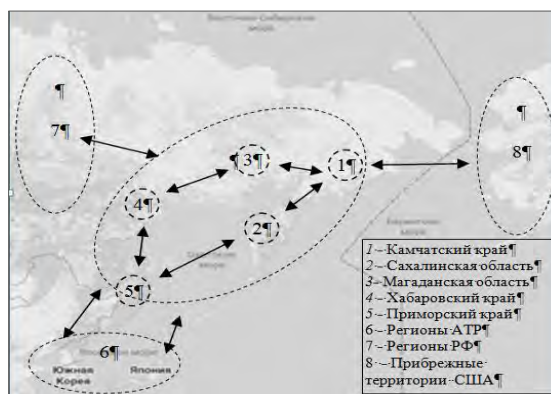


Рис. 1. Схема географического расположения рыбопромышленных предприятий в регионах Дальнего Востока России

Проведённые нами расчёты показали, что в структуре вылова ДФО за 2007-2018 гг. на Приморский край приходилось в среднем 30-33% общего объёма выловленной рыбной продукции (по разным годам, до 830 тыс. тонн), на Камчатский край

– примерно столько же (до 781 тыс. тонн), на Сахалинскую область – около 25% (до 587 тыс. тонн), на Хабаровский край – 6% (до 151 тыс. тонн), и на Магаданскую область – 4% (около 108 тыс. тонн).

Проблема формирования рыбопромышленного кластера в ДФО неоднократно обсуждалась как в научных кругах, так и в структурах отраслевого и государственного управления. Позже данное направление стало обозначаться в программе «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона» [11] и в Стратегии социально-экономического развития Приморского края на 2013–2017 гг. [12]. Аналогичные программы развития других регионов Дальнего Востока также включают в себя разработку данного комплекса вопросов.

В 2014 году администрацией Приморского края для разработки кластерной модели развития рыбной отрасли региона был приглашен японский Исследовательский институт Номура (Nomura Research Institute или NRI). NRI был сформирован научный консорциум, в состав которого вошли иностранные и российские научно-исследовательские институты: ТИНРО-Центр и ДНИИМФ. В концепции предполагалось, что рыбный кластер станет единым для всего Дальнего Востока и включит в себя производственные объекты по рыбопереработке. Проект несколько раз дорабатывался, но, получив в ходе обсуждения много критических замечаний, так и не был внедрен.

На сегодняшний день разработки NRI утратили свою актуальность, и, по поручению Президента России, для создания рыбопромышленных кластеров в ДФО Федеральное агентство по рыболовству РФ разработало альтернативный проект [13]. Согласно новой концепции основные мощности кластера будут располагаться во Владивостокской агломерации Приморского края. Также в регионе предлагается инициировать пять первоочередных инвестиционных проектов с объемом инвестиций 14 млрд руб. [14]. На начало 2019 г. в рамках развития экономики рыбной промышленности Дальнего Востока сформирован инвестиционный портфель, включающий 14 проектов строительства заводов с инвестициями в объеме 15 млрд руб. и 18 проектов строительства судов для промысла биоресурсов объемом инвестиций порядка 94 млрд руб. [15].

При исследовании вопросов формирования и государственного регулирования процессов кластеризации рыбной промышленности в регионах Дальнего Востока возникает следующий вопрос: почему в ДФО, в котором 11 субъектов, большинство из которых имеет выход к морю, и на территории которых находятся рыбопромышленные предприятия, создана промышленная и научная, образовательная и портовая инфраструктура, в качестве приоритетного для формирования кластера определяется именно Владивостокская агломерация?

Отвечая кратко на этот вопрос, можно сказать следующее. В условиях ограниченности инвестиционных и иных ресурсов возникает жесткая необходимость определить приоритетное направление инвестирования бюджетных средств и внебюджетных ресурсов. В связи с этим возникают очень важные методические и практические вопросы

– как, какими методами определить наиболее эффективное направление и место (регион, территорию) вложения ресурсов, по каким критериям определять наиболее приемлемый, перспективный регион для создания кластера, какие критерии оценки эффективности его работы использовать, что необходимо сделать в первую очередь и т.д.?

В настоящей статье мы ограничились рассмотрением только одного вопроса из этого (далеко не полного) перечня – рассмотреть подход к ранжированию регионов по степени их приоритета к «запуску» процессов формирования кластеров с позиций локализации предприятий рыбной промышленности, обладающих для этого известным потенциалом.

1. Теоретическая основа исследования

Проводимое нами исследование основывается на работах зарубежных и российских учёных и специалистов. В общей теории и методологии концепции промышленных кластеров мы основывались на работах Бергмана Э. [3], Портера М. [1, 2], Розенфельда С. [16], Шимански С. [17], Энрайта М. [4], Элиссона Г. Глейзера Е. [18].

В области разработки и использования моделей, методов экономико-географического моделирования и исследования пространственного развития промышленности России и Дальнего Востока мы опирались на работы Бакланова П.Я. [19], Гранберга А.Г. [20], Маркова Л.С. [5], Минакира П.А. [21], Михеевой Н.Н. [22], Мошкова А.В. [23], Пилипенко И.В. [24], Растворцевой С.Н. [25], Романова М.Т. [23] и других.

2. Методический подход к исследованию рыбопромышленных кластеров

I. В настоящей статье используются следующие основные понятия: рыбная промышленность – виды деятельности по рыболовству и сохранению водных биоресурсов, аквакультуре, производству и реализации рыбной и иной продукции из водных биоресурсов; рыболовство – деятельность по добыче (вылову) водных биоресурсов; рыбоводство – выращивание рыбы, других водных животных и растений, выращивание гребешка, трепанга, ламинарии, лососевых и других видов. Основные виды рыболовства и хозяйственной деятельности в области добычи водных биоресурсов определены в Федеральном законе № 166-ФЗ от 20 декабря 2004 г. «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» [26].

II. В экономических исследованиях для оценки степени локализации производственных субъектов применяются различные инструменты и показатели, например, индекс Херфиндала-Хиршмана, индекс П. Кругмана, индекс Элиссона-Глейзера, индекс Джини, индексы концентрации и др.

В качестве традиционного инструмента в экономических исследованиях часто применяют индексы оценки локализации и специализации отраслей [5, с.121]. При этом различные источники указывают, например, на довольно значительный разброс пороговых значений индекса концентрации – от 0,8 до 2. Его величина позволяет судить о высоком (при индексе концентрации более 2), или низком (при его значении, равном менее 0,8) значении этого показателя [5, с. 130].

III. На основе традиционных, апробированных и доказавших свою надёжность методов оценки концентрации производственных объектов нами предложен методический подход к оценке концентрации предприятий рыбной промышленности, учитывающий возможности получения и использования официально доступной статистической информации, особенности действующей в рыбной промышленности отчетности и производственной структуры, а также специфику взаимодействия входящих в нее субъектов и осуществляемых ими видов экономической деятельности.

Первый этап предлагаемого подхода предполагает расчет шести коэффициентов локализации. Их расчёт и сопоставление позволяет проанализировать и оценить отраслевую специализацию территории с учетом таких показателей как объём валового регионального продукта (ВРП), численности предприятий, среднесписочной численности занятости в отрасли, наличия малых предприятий, размера инвестиций в основной капитал и плотность распределения предприятий на территории региона. По нашему мнению, данные коэффициенты позволяют выявить признаки кластеризации предприятий рыбной промышленности в регионе. При этом, для более глубокого и детального исследования, число коэффициентов может быть увеличено и уточнено.

На втором этапе рассчитывается обобщающий интегральный показатель локализации рыбной промышленности, учитывающий предварительные результаты расчётов шести коэффициентов, который моделируется на основе аддитивной модели. Рассмотрим их более подробно.

Первый этап.

1. Коэффициент специализации производства (K_q) рассчитывается на основе

формулы: $\frac{q_i^f}{\sum_f q_i^f} / \frac{\sum_i q_i^f}{\sum_t \sum_i q_i^f}$ где: t – индекс отрасли; f – индекс

рыболовства и рыбоводства; i – индекс региона; q_i^f – валовой объём выпуска предприятий рыболовства и рыбоводства в i -м регионе, руб.; $\sum_t Q_i^f$ – объём валового выпуска продукции предприятий всех отраслей в i -м регионе, руб.; $\sum_i q_i^f$ – совокупный объём выпуска продукции всех предприятий рыболовства и рыбоводства в стране, руб.; $\sum_t \sum_i q_i^f$ – объём валового выпуска продукции предприятий всех отраслей в стране, руб.

2. Коэффициент локализации предприятий и организаций рыболовства и рыбоводства в регионе (K_p). Он рассчитывается по

формуле: $\frac{p_i^f}{\sum_f p_i^f} / \frac{\sum_i p_i^f}{\sum_f \sum_i p_i^f}$ где: p_i^f –

численность предприятий и организаций рыболовства и рыбоводства в i -м регионе, ед.; $\sum_t P_i^f$ – суммарная численность предприятий всех отраслей в i -м регионе, ед.; $\sum_f p_i^f$ – численность предприятий рыболовства и рыбоводства в стране, ед.; $\sum_t \sum_i p_i^f$ – суммарная численность предприятий всех отраслей в стране, ед.

3. Коэффициент душевого производства (K_w). Он

рассчитывается по формуле: $\frac{q_i^f}{\sum_f q_i^f} / \frac{w_i}{\sum_i w_i}$ где: q_i^f –

валовой объём выпуска продукции всех предприятий рыболовства и рыбоводства в i -м регионе, руб.; $\sum_t Q_i^f$ – объём валового выпуска продукции предприятий всех отраслей в i -м регионе, руб.; w_i – численность населения в i -м регионе, чел.; $\sum_i w_i$ – численность населения в стране, чел.

4. Коэффициент локализации малых предприятий рыболовства и рыбоводства (K_s) рассчитывается по

формуле: $\frac{s_i^f}{\sum_f s_i^f} / \frac{\sum_t s_i^f}{\sum_t \sum_i s_i^f}$ где: s_i^f – численность малых

предприятий рыболовства и рыбоводства в i -м регионе, ед.; $\sum_t S_i^f$ – общая численность малых предприятий всех отраслей в i -м регионе, ед.; $\sum_f s_i^f$ – численность малых предприятий рыболовства и рыбоводства в стране, ед.; $\sum_t \sum_i s_i^f$ – общая численность малых предприятий всех отраслей в стране, ед.

5. Коэффициент локализации инвестиций в основной капитал (K_i) рассчитывается по

формуле: $\frac{v_i^f}{\sum_f v_i^f} / \frac{\sum_t v_i^f}{\sum_f \sum_t v_i^f}$ где: v_i^f – объём инвестиций в

основной капитал предприятий рыболовства и рыбоводства в i -м регионе, руб.; $\sum_t V_i^f$ – совокупный объём инвестиций в основной капитал предприятий всех отраслей в i -м регионе, руб.; $\sum_i v_i^f$ – совокупный объём инвестиций в основной капитал предприятий рыболовства и рыбоводства в стране, руб.; $\sum_t \sum_i v_i^f$ – объём инвестиций в основной капитал предприятий всех отраслей в стране, руб.

6. Коэффициент плотности объектов рыболовства и рыбоводства (K_d) рассчитывается по

формуле: $K_d = \frac{p_i^f}{S_i}$ где: S_i – площадь анализируемого региона, км².

Второй этап.

На завершающем этапе рассчитывается интегральный коэффициент (K_{int}) – коэффициент локализации рыбной промышленности, позволяющий объединить результаты расчетов всей совокупности коэффициентов (т. н. шестифакторная модель оценки возможности кластеризации рыбной промышленности в регионе). Он определяется по формуле: $\frac{\sum (K_q; K_p; K_w; K_s; K_i; K_d)}{n}$, где: $K_q; K_p; K_w; K_s; K_i; K_d$; – соответствующие коэффициенты, рассмотренные выше; n – число коэффициентов (т. н. «факторов»), применяемых в расчете.

3. Анализ коэффициентов

На основе данных официальной статистики [9] нами были рассчитаны предложенные и рассмотренные выше коэффициенты локализации (см. табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты локализации рыбной промышленности ряда регионов ДФО

№	Субъекты ДФО, производящие основной объем рыбной продукции	K_d	K_q	K_w	K_p	K_s	K_i	K_{int}
1	Приморский край	0,0030	18,7	15,8	4,8	3,1	23,3	8,2
2	Хабаровский край	0,0007	4,0	3,8	8,4	4,5	4,5	3,1
3	Камчатский край	0,0017	56,9	69,8	46,8	23,3	103,3	37,5
4	Магаданская область	0,0003	11,8	23,0	16,3	13,3	2,9	8,4
5	Сахалинская область	0,0105	12,5	57,6	33,5	30,4	17,6	18,9

Анализ частных показателей локализации и интегрального коэффициента позволяет, на наш взгляд, более детально проанализировать сложившуюся ситуацию и сделать вывод о том, что наибольшим потенциалом для формирования рыбопромышленного кластера имеют предприятия и организации рыбной промышленности, рыболовства и рыбоводства следующих регионов Дальнего Востока: Камчатского края (значение интегрального коэффициента – 37,51), Сахалинской и Магаданской областей (соответственно 18,95 и 8,41) (рис. 2).

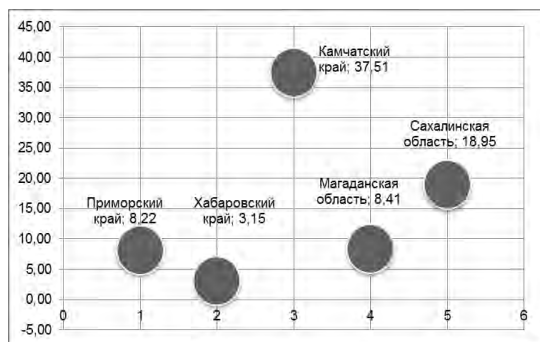


Рис. 2. Интегральный коэффициент локализации рыбной промышленности некоторых регионов ДФО

Заключение

Вывод, который следует из проведенного нами анализа на основе использования коэффициентов локализации, на первый взгляд, выглядит несколько неожиданным. Действительно, несмотря на то, что в настоящее время на предприятия и организации рыбной промышленности Приморского края приходится основной объем вылова и производства

рыбной продукции, он потенциально пока не является приоритетным регионом с точки зрения формирования на его территории рыбопромышленного кластера (см. рис. 2). Это объясняется тем, что для экономики Приморья, в отличие, скажем, от таких регионов, как Камчатский край и Сахалинская область, рыбная отрасль (как совокупность однородных предприятий определенной сферы деятельности), как это не странно звучит, не является профильной.

Расчет индекса важности значения отраслей для экономики региона, проведенное нами ранее [8, с. 55] показал, что рыбопромышленная отрасль по интегральному значению для экономики Приморского края уступает, в частности, транспорту и логистике, торговле и сельскому хозяйству, строительству, операциям и услугам в области недвижимого имущества и некоторым другим видам экономической деятельности.

Конечно, мы понимаем, что предложенный нами подход, не может претендовать на единственно верный и всеобъемлющий, и, кроме того, как в методическом, так и в теоретическом плане он, безусловно, нуждается в развитии и уточнении. Вместе с тем, несмотря на известную ограниченность и условность предложенных нами коэффициентов, не полный учёт всех факторов, так или иначе влияющих на резульативный показатель, известный субъективизм оценок, регрессивность и неточность данных и т.д., мы считаем, что данный рейтинг целесообразно рассчитывать и учитывать при анализе состояния, тенденций развития и разработке социально-экономических и финансовых мер по развитию рыбной промышленности на Дальнем Востоке и формированию рыбопромышленных кластеров в регионе. Он, с нашей точки зрения, позволяет дать предварительную оценку для перспективных государственных инвестиционных решений, помочь разработать комплексную стратегию по развитию рыбопромышленных кластеров в ДФО, а, следовательно, может быть использован в практическом и организационно-методическом обеспечении этой работы.

Полученные результаты проведенного нами исследования могут, на наш взгляд, стать одним из инструментов для более детального и глубокого анализа ситуации в развитии рыбопромышленного комплекса Дальнего Востока, а также быть учтены при разработке экономических мероприятий и программ по развитию и регулированию отрасли, и на этой основе – прогнозирования экономических процессов в рыбном хозяйстве региона на основе формирования современных высокотехнологичных и конкурентоспособных рыбопромышленных кластеров.

Дополнительная информация

Статья подготовлена при поддержке Федерального агентства по рыболовству по теме «Разработка методических основ по применению кластерного анализа в исследовании рыбной промышленности и рынков рыбной продукции на Дальнем Востоке России», НИР № 745 / 2019.

Литература

1. Porter, M.E. Clusters, Innovation and Competitiveness: New Findings and Porter M.E. Porter. N.Y., 2008. URL: <https://www.academia.edu> (дата обращения: 05.10.2019).
2. Porter M. The Competitive Advantage of Nations. New York: Free Press. 1990. 875 p.
3. Bergman E.M., Feser E.J. Industrial and Regional Clusters: Concepts and Comparative Applications. Online web book in regional science. Regional Research Institute. West Virginian University. 1999. URL: [http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Bergman – Feser/chapter3.htm](http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Bergman-Feser/chapter3.htm) (дата обращения: 03.10.2019).
4. Enright M.J. Regional clusters: what we know and what we should know. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003. 552 p.
5. Марков Л.С. Теоретико-методологические основы кластерного подхода. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2015. – 300 с.
6. World's Leading Shipyard & Marine Engine Builder. URL: <http://www.hyundai-holdings.com/?p=90> (дата обращения: 02.10.2019).
7. Мореходов М.А. Судостроение за рубежом. Южная Корея. 2011. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/sudostroenie_za_rubezhom_yuzhnaya_koreya.html (дата обращения: 02.10.2019).
8. Лесовский Б.Ф., Салтыков М.А. Проблемы и перспективы кластеризации морехозяйственного комплекса Приморского края. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. –103 с.
9. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018 / Росстат. М., 2018. – 1162 с.
10. Рыбохозяйственный комплекс Приморского края: сборник с аналитической запиской / Приморскстат. – Владивосток, 2018. – 43 с.
11. Распоряжение Правительства РФ от 29 марта 2013 г. N 466-р «Об утверждении государственной программы «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона». URL: <http://base.garant.ru/70351168/> (дата обращения: 07.10.2019).
12. Программа социально-экономического развития Приморского края на 5 лет (2013 – 2017 годы). URL: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/economics> (дата обращения: 02.10.2019).
13. Перечень поручений Президента по итогам заседания президиума Госсовета // Fishnews: информационно-аналитический журнал. 2015. URL: <https://fishnews.ru/rubric/ofitsialno/9791> (дата обращения: 08.11.2019).
14. Салтыков М.А., Майсс А.А., Бубновская Т.В. Рыбохозяйственный комплекс Приморского края на современном этапе развития: экономика, финансы, управление. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018. – 312 с.
15. Юрий Трутнев провел заседание по развитию рыбопромышленного комплекса ДФО. URL: <https://minvr.ru/press-center/news/21405/> (дата обращения: 03.10.2019).
16. Rosenfeld S.A. Bringing business clusters into the mainstream of economic development. European Planning Studies. 1997. No. 5, pp. 3 – 23.
17. Czamanski S., Ablas L.A. Identification of industrial clusters and complexes: a comparison of methods and findings. Urban studies. 1997. No. 16, 61 – 80.
18. Ellison G., Glaeser E. The geographic concentration of industry: does natural advantage explain agglomeration? American Economic Review. 1999. Vol. 89. № 2, pp. 311 – 316.
19. Бакланов П.Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении. М.: Наука, 2007. –239 с.
20. Гранберг А.Г., Суслов В.И., Суспицын С.А. Экономико-математические исследования многорегиональных систем // Регион: экономика и социология. – 2008 – № 2 – С. 120 –150.
21. Синтез научно-технических и экономических прогнозов: Тихоокеанская Россия – 2050 / под ред. П.А. Минакира, В.И. Сергиенко; Рос. акад. наук, Дальневост. отд-ние, Ин-т экон. исследований. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 912 с.
22. Структурно-инвестиционная политика в целях обеспечения экономического роста в России: монография / Под науч. ред. акад. В.В. Ивантера. – М.: Научный консультант. – 2017. – 196 с.
23. Бакланов П.Я., Мошков А.В., Романов М.Т. Территориальные структуры хозяйства и экономические районы в долгосрочном развитии российского Дальнего Востока // Вестник ДВО РАН, – 2011. – № 2. – С. 18 –28.
24. Пилипенко И.В. Конкурентоспособность регионов и кластерная политика в России // Модернизация экономики и глобализация. [В 3-х кн.] Книга 3. / Отв. ред. Е.Г. Ясин. -Москва: Изд. дом ГУ-ВШЭ, 2009.– С. 285-293.
25. Растворцева С.Н. Экономическая активность регионов России // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2018. Т. 11(1). С. 84 – 99.
26. Федеральный закон от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50799 (дата обращения: 04.10.2019).

References

1. Porter, M.E. Clusters, Innovation and Competitiveness: New Findings and Porter / M.E. Porter. N.Y.2008. URL: <https://www.academia.edu> (дата обращения: 05.10.2019).
2. Porter M. The Competitive Advantage of Nations. New York: Free Press, 1990. 875 p.
3. Bergman E.M., Feser E.J. (1999). Industrial and Regional Clusters: Concepts and Comparative Applications. Online web book in regional science. Regional Research Institute. West Virginian University. URL: [http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Bergman – Feser/chapter3.htm](http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Bergman-Feser/chapter3.htm) (дата обращения: 03.10.2019).
4. Enright M.J. Regional clusters: what we know and what we should know. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003. 552 p.

5. Markov L.S. Teoretiko-metodologicheskie osnovy klasternogo podkhoda [Theoretical and methodological basis of cluster approach]. Novosibirsk: IEOPP SO RAS, 2015. 300 s.
6. World's Leading Shipyard & Marine Engine Builder. URL: <http://www.hyundai-holdings.com/?p=90> (дата обращения: 02.10.2019).
7. Morekhodov M.A. Sudostroenie za rubezhom. Yuzhnaya Koreya. 2011 [Shipbuilding abroad. South Korea]. https://www.korabel.ru/news/comments/sudostroenie_za_rubezhom_yuzhnaya_koreya.html (дата обращения: 02.10.2019).
8. Lesovskiy B.F., Saltykov M.A. Problemy i perspektivy klasterizatsii morekhozyaystvennogo kompleksa Primorskogo kraya [Problems and prospects for the clustering of the marine sector of the Primorsky territory]. Vladivostok: Dal'rybvuz, 2011. 103 s.
9. Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli [Regions of Russia. Socio-economic indexes]. Rosstat. M., 2018. 1162 s.
10. Rybokhozyaystvennyy kompleks Primorskogo kraya: sbornik s analiticheskoy zapiskoy [Fisheries complex of Primorsky region: collection with analytical note]. Primorskstat. Vladivostok, 2018. 43 s.
11. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 marta 2013 g. N 466-r «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy «Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitiye Dal'nego Vostoka i Baykal'skogo regiona» [On Approval of the State Program Social and Economic Development of the Far East and the Baku Region]. URL: <http://base.garant.ru/70351168> (дата обращения: 07.10.2019).
12. Programma sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Primorskogo kraya na 5 let (2013–2017 gody) [Program of social and economic development of Primorsky region for 2013–2017 period]. URL: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/economics> (дата обращения: 02.10.2019).
13. Perechen' porucheniy Prezidenta po itogam zasedaniya prezidiuma Gossoveta // Fishnews: informatsionno-analiticheskii zhurnal. 2015. [List of instructions of the President for the State Council]. URL: <https://fishnews.ru/rubric/ofitsialno/97912149> (дата обращения: 08.11.2019).
14. Saltykov M.A., Mayss A.A., Bubnovskaya T.V. Rybokhozyaystvennyy kompleks Primorskogo kraya na sovremennom etape razvitiya: ekonomika, finansy, upravlenie [Fisheries complex of the Primorsky territory at the present stage of development: economics, finance, management]. Vladivostok: Dal'rybvuz, 2018. 312 s.
15. Yuriy Trutnev provel zasedanie po razvitiyu rybopromyshlennogo kompleksa DFO [Yuri Trutnev held a subcommission for the development of the fishing complex Russia Far East]. URL: <https://minvr.ru/press-center/news/21405/> (дата обращения: 03.10.2019).
16. Rosenfeld S.A. (1997). Bringing business clusters into the mainstream of economic development. European Planning Studies, No. 5, pp. 3 – 23.
17. Czamanski S., Ablas L.A. (1997). Identification of industrial clusters and complexes: a comparison of methods and findings. Urban studies, No. 16, pp. 61 – 80.
18. Ellison G., Glaeser E. (1999). The geographic concentration of industry: does natural advantage explain agglomeration? American Economic Review, Vol. 89. No 2, pp. 311 – 316.
19. Baklanov P.Ya. Territorial'nye struktury khozyaystva v regional'nom upravlenii [Territorial structures of economy in regional management]. M.: Nauka, 2007. 239 s.
20. Granberg A.G., Suslov V.I., Suspitsyn S.A. Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya mnogoregional'nykh sistem [Economic-mathematical researches of multiregional systems]. Region: ekonomika i sotsiologiya. 2008. № 2, S. 120 –150.
21. Sintez nauchno-tekhnicheskikh i ekonomicheskikh prognozov: Tikhookeanskaya Rossiya – 2050 [Synthesis of scientific, technical and economic forecasts: Pacific Russia – 2050]. Pod red. P.A. Minakira, V.I. Sergienko; Ros. akad. nauk, Dal'nevost. otd-nie, In-t ekon. issledovaniy. – Vladivostok: Dal'nauka, 2011. 912 s
22. Strukturno-investitsionnaya politika v tselyakh obespecheniya ekonomicheskogo rosta v Rossii: monografiya [Structural and investment policy for the purpose of ensuring the economic growth of Russia]. Pod nauch. red. akad. V.V. Ivantera. M.: Nauchnyy konsul'tant. 2017. 196 s.
23. Baklanov P.Ya., Moshkov A.V., Romanov M.T. Territorial'nye struktury khozyaystva i ekonomicheskie rayony v dolgosrochnom razvitiu rossiyskogo Dal'nego Vostoka [Territorial structures of economy and economic areas in the long – term development of the Russian Far East]. Vestnik DVO RAN, 2011. № 2, S. 18 – 28.
24. Pilipenko I.V. Konkurentosposobnost' regionov i klasternaya politika v Rossii [Competitiveness of regions and cluster policy in Russia]. Modernizatsiya ekonomiki i globalizatsiya. [V 3-kh kn.] Kniga 3. / Otv. red. E.G. Yasin. - Moskva: Izd. dom GU-VShE, 2009. S. 285 – 293.
25. Rastvortseva S.N. Ekonomicheskaya aktivnost' regionov Rossii [Economic activity in Russian regions]. Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz. 2018. T. 11(1). S. 84 – 99.
26. Federal'nyy zakon ot 20 dekabrya 2004 g. № 166-FZ «O rybolovstve i sokhranении vodnykh biologicheskikh resursov» [On fisheries and conservation of aquatic biological resources]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50799 (дата обращения: 04.10.2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Иванович Фисенко, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50 А e-mail: fisenko@msun.ru

Andrei I. Fisenko, Dr. Sci. (Econ), Professor, Professor of Economics Department, Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy, Verkhneportovaya, 50a, St., Vladivostok, 690059, Russian Federation, e-mail: fisenko@msun.ru

Максим Александрович Салтыков, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики, управления и финансов Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: saltykov_ma@mail.ru

Maksim A. Saltykov, Ph.D. (Econ), Associate Professor of Economics, management and finance Department Far East State Technical Fisheries University, Lugovaja, 52B, St., Vladivostok, 690087, Russian Federation e-mail: saltykov_ma@mail.ru

DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.085

УДК 656.022.41

Транзитный потенциал Северного морского пути

В.А. Лазарев^{1,2}, А.И. Фисенко¹¹Морской государственный университет им. Г.И.Невельского, ²Институт экономических исследований ДВО РАН

Аннотация. Статья предлагает авторский взгляд на логистические особенности Северо-Восточного Китая и возможности, которые в связи с этим открываются для России. Будучи владельцем двух крупных транспортных путей – железнодорожного в виде Транссибирской магистрали и водного в виде Северного морского пути, Россия может оказать помощь в развитии этого региона к взаимной выгоде обеих стран. Логистические издержки, которые ограничивают движение товарных потоков из Северо-Восточных провинций Китая на свободные рынки, могут быть существенно уменьшены при разумном использовании возможностей портов юга Приморья, что приведет к повышению уровня жизни в этих провинциях, снижению демографического давления на Россию со стороны Китая и в целом к дальнейшему процветанию и росту безопасности макрорегиона Дальний Восток России – Северо-Восток Китая. Рассмотрены ранее неиспользованные возможности для развития транзитного потенциала Северного морского пути. Обеспечение этих возможностей требует реализации ряда мероприятий, которые включают меры по развитию портов и логистики Северного морского пути.

Ключевые слова: логистика, глобальные цепи поставок, демографическое давление, Арктика, Северный морской путь, логистическое сопротивление, транзитный коридор

Transit potential of the Northern sea route

Vladimir A. Lazarev^{1,2}, Andrey I. Fisenko¹¹Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, ²Economic Research Institute FEB RAS, Russian Federation

Abstract. The article offers the author's view on the logistical issues of Northeast China and the opening opportunities for Russia. Being the owner of two major transport routes - the railway road in the form of the Trans-Siberian Railway and the waterway in the form of the Northern Sea Route, Russia can assist in the development of this Chinese region to the mutual benefit of both countries. Logistical costs that limit the movement of goods flow from the Northeastern provinces of China to the free markets can be significantly reduced with a reasonable use of the capabilities of the ports in the South Primorye. The forthcoming outcome is the increase in living standards in these provinces and the reduction in the demographic tension to Russia from the side of China and, in general, the further prosperity and the growth of security in the macro-region including Russian Far East and Northeast China. Unused opportunities for developing of the transit potential of the Northern Sea Route are considered. Providing these opportunities requires the implementation of the complex measures including development of ports and logistics of the Northern Sea Route.

Keywords: logistics, global supply chain, demographic tension, Arctic, Northern Sea Route, logistic resistance, transit corridor

Введение

В настоящее время наблюдается развитие и интенсивное усиление процессов, увеличивающих интерес национальных экономик к наиболее эффективным транспортным путям. Более полутора миллиарда потребителей в Китае и еще порядка 3-х миллиардов потребителей в тяготеющей к нему экономической зоне, включающей Юго-Восточную Азию и Индию, создают материальную основу для минимизации транспортных издержек производителей товаров и услуг. При этом наблюдается вывод промышленного производства из стран Европейского союза с преобразованием экономики в формат сервисной, постиндустриальной. В условиях индустриально-постиндустриальной экономики мультипликативный результирующий тренд превращает азиатский промышленный центр в ядро мирового материального производства, а страны, относимые к группе развитых – в центр интеллектуального производства.

Анализ востребованности нового маршрута

Население северо-восточных провинций Китая создает «избыточное» демографическое давление на соседние страны, прежде всего на Россию.

Суммарное население провинций Heilongjiang (Хэйлунцзян), Jilin (Дзилинь) и Nei Mongol (Inner Mongolia, Внутренняя Монголия), граничащих с Россией, превышает 90 млн. чел. (по оценкам 2010 года), а средняя плотность населения в этих регионах Китая составляет 50 чел. на квадратный километр. Если не учитывать относительно малонаселенную Внутреннюю Монголию, плотность населения в двух провинциях превышает 105 чел. на квадратный километр. По другую сторону российско-китайской границы – малонаселенный Дальний Восток со средней плотностью населения 1 чел. на квадратный километр. В наиболее населенном регионе Дальнего Востока – Приморском крае – плотность населения составляет чуть больше 11 чел. на квадратный километр. Такая разница в плотности населения не может не сказываться на взаимоотношениях стран-соседей. За последние 150 лет соседства между Россией и Китаем по крайней мере трижды возникали приграничные конфликты военного характера, где демографическое давление было спусковым крючком.

Северо-восточные провинции Китая на фоне других провинций (прежде всего, центральных и южных приморских), по-видимому, можно отнести к умеренно депрессивным регионам. Несмотря на достаточно высокие экономические показатели,

(например, ВВП на душу населения во Внутренней Монголии был 10133 долларов США в 2018 году при абсолютном максимуме 11500 долларов в 2015 году), число безработных в указанных регионах оценивается в 8-10 млн. чел., что составляет порядка 10% их общего населения. Гипотеза, выдвигаемая авторами, заключается в том, что одним из основных ограничителей развития северо-восточных провинций Китая в настоящее время выступает повышенное сопротивление логистической цепи поставки товаров, произведенных в регионе.

Под сопротивлением участка цепи поставки понимается относительная величина, выраженная как прирост полных издержек владельца на преодоление грузовой единицей участка цепи поставки, отнесенный к первоначальной товарной стоимости данной грузовой единицы. Соответственно сумма таких приростов по всей цепи поставки сформирует полное сопротивление логистической цепи:

$$D=(E_f - E_b) / E_b \quad (1)$$

где E_f – полные издержки по владению товаром в конце логистической цепи или ее фрагмента, E_b – полные издержки по владению товаром в начале логистической цепи или ее фрагмента. По мнению авторов, допустимым уровнем логистического сопротивления можно считать 0,15, что соответствует сопротивлению логистических цепей при транспортировке сельскохозяйственной продукции в Европе. Повышенное логистическое сопротивление оказывает негативное влияние на грузораспределительные цепи в целом.

Повышенное сопротивление логистической цепи поставки товаров приводит к увеличению затрат на транспортировку – как временных, так и финансовых. Причина этого заключается в том, что у северо-восточных провинций Китая отсутствует прямой выход к крупным транспортным узлам глобальных логистических сетей. Основной путь грузопотока из этих провинций – автомобильная или железнодорожная доставка до крупного порта Желтого моря, затем – морем через Суэцкий канал в Европу или через Тихий Океан в Америку. Этот путь формирует основные временные и финансовые издержки на наземном сегменте, потому что автомобильные и железные дороги Китая очень загружены. Для примера: путь грузового железнодорожного состава от города Харбин до границы с Россией длиной около 500 километров в 2008 г. занимал трое суток. И хотя к настоящему времени Китай построил скоростные железнодорожные магистрали, но они используются для пассажирских перевозок и не могут быть использованы для грузовых из-за высокой скорости движения на перегонах.

Сегодня Китай пытается решить проблему логистической доступности производственных мощностей северо-восточных провинций Китая самостоятельно путем реализации проекта «Один пояс – один путь», однако, как нам кажется, этот проект развивается медленно из-за большого числа заинтересованных лиц с противоположными намерениями. Китай заинтересован сделать этот путь быстрым и дешевым. Страны, которые входят в число участников интеграционной инициативы, ожидают получить значительные выгоды от

предоставления китайским грузам права движения через свою национальную территорию.

Российское логистическое предложение для Северо-Восточного Китая

Российская Федерация является владельцем двух крупных ресурсов, позволяющих быстро доставлять товары из Азии в Европу – Транссибирской магистрали и Северного морского пути. Транзитные возможности Транссибирской магистрали невелики, ее потенциал близок к исчерпанию. Арктика находится в зоне пристального внимания мировых экономик. Акватория Северного ледовитого океана вызывает все больший интерес не только у стран, территории которых непосредственно к нему прилегают, но и у стран, экономическое состояние которых напрямую зависит от внешних источников ресурсов, включая потенциальную ресурсную базу арктического региона и низкзатратные пути транспортировки товарной продукции.

Наличие огромных запасов природных ресурсов в Арктике и очевидные преимущества использования северных морских коммуникаций обуславливают повышенный интерес к Арктике со стороны ведущих мировых держав. Так, например, доминирующей тенденцией в геостратегии США, Канады, Дании и Норвегии становится разработка национальных программ и доктрин, обосновывающих исключительные права на ведение экономической деятельности в своих секторах Арктики. Канада приняла решение о полном прекращении коммерческой эксплуатации своего северного пути – North-Western Passage (Северо-западный проход) – до 2020 года, и, соответственно, должна бы препятствовать любым попыткам других стран вести такую деятельность в зоне своих интересов. Однако, ситуация очевидным образом меняется. В 2017 году через Северо-западный проход прошло 31 судно, в 2018 – пять судов, а в 2019 году береговая охрана Канады сообщила о 27 транзитных судах, включая пять сухогрузов и пять пассажирских судов. При этом высказано мнение, что несмотря на опасность арктических путей вследствие плохо прогнозируемых ледовых условий и трудностей со страхованием судов и грузов, Канада планирует использовать Северо-западный проход и получать выгоды от его использования, рассматривая его как «мягкую силу» в международных отношениях. Для закрепления и расширения своих особых привилегий в Арктике государства пытаются использовать свое влияние на законодотворческие механизмы в рамках международных организаций. В этих условиях неарктические державы стремятся использовать узкие места в международном законодательстве и свое финансово-экономическое влияние для проникновения на обширный потенциальный рынок арктических перевозок и добычи углеводородов на континентальном шельфе. В настоящее время – это главным образом Китай и Южная Корея с их особым интересом к Арктике.

Первый сухогруз ледового класса, который в официальной китайской прессе называют ледоколом, Китай купил у Украины в 1993 году. Судно получило название Xuelong, или «Снежный дракон». С 1994 года Китай проводит регулярные исследования в Арктике, а в 2009 году Госсовет КНР

принял программу строительства собственного ледокольного флота. Первый полностью китайский гражданский ледокол должен был быть готов в 2013 году, однако его строительство началось в конце 2016 года компанией Jiangnan Shipyard. В сентябре 2018 года он был спущен на воду и получил имя Xuelong 2, водоизмещением 13990 тонн, при длине 122 метра и ширине 22,3 метра. Китайская народная армия также имеет в своем распоряжении ледоколы. 28 декабря 2015 года в Хулудао (провинция Ляонин) состоялась церемония ввода в состав Северного флота ВМС НОАК нового дизель-электрического ледокола Haibing 722 (проект 272), построенного Bohai Shipbuilding Heavy Industry Company, Ltd (BSHIC). Ледоколы проекта 272 имеют водоизмещение 4860 тонн при длине 103 метра и ширине 18,4 метра. В 2016 году был введен в строй аналогичный Haibing 723.

Корея также строит собственный ледокольный флот. Первый построенный в Корее ледокол Agaon водоизмещением 6950 тонн введен в эксплуатацию в 2009 году, и в настоящее время проводит исследования в Арктике и Антарктиде. Япония, обладающая крупной экспортно-ориентированной экономикой, нацелена в большей степени на торговлю с Северной Америкой, поэтому ее участие в процессах в Арктике пока не проявляется.

Использование Северного морского пути для линейного судоходства имеет определенные проблемы, связанные с международными обязательствами России. Прежде всего, Конвенция ООН по морскому праву 1982 года обязывает Россию предоставлять доступ иностранным судам к акватории Северного морского пути. Однако в случае, если прибрежные воды более полугода покрыты льдом, государство имеет право устанавливать особые правила плавания. Россия должна установить правила допуска судов к транзиту через Северный морской путь, который должен включать требования к ледовому классу судов не ниже Arc4 (по РМРС 2008) и требования к страхованию судна и груза, включая страхование ответственности за подъем затонувшего судна. Возможно, потребуется разработать специальный «ледовый сбор», который будет обеспечивать судну подключение к системе мониторинга ледовой обстановки, включая корректировку маршрута судна при перемещении ледовых полей, рекомендацию захода в порт-убежище или ледокольную помощь. Также необходимо проработать механизм возврата инвестиций в развитие инфраструктуры Северного морского пути, включая обеспечение портов-убежищ. Одновременно видится совершенно необходимым признание ледокольной проводки коммерческой деятельностью, что обеспечит абсолютный приоритет для российских ледоколов в исключительной экономической зоне России.

Экономическая эффективность Северного морского пути

С точки зрения включения Северного морского пути в мировую транспортную систему наиболее важным фактором оказывается оценка выгоды такого пути для товаровладельцев. В настоящее время грузы из Азии в Европу перемещаются через Индийский океан и Суэцкий канал. Для северо-восточных провинций Китая основным является

наземный маршрут до порта Далянь и далее морской маршрут Далянь-Гамбург через Суэцкий канал. Расстояние от Даляня до Гамбурга морем составляет 11200 морских миль. Опыт показывает, что в 2019 году маршрут Далянь-Гамбург занимал от 35 до 45 суток и стоил около 1500 долларов США за двадцатифутовый контейнер, включая примерные платежи:

- морской сбор в размере 200 долларов США;
- бункерный фактор BAF в размере 800 долларов США (который будет расти в связи с требованием применения малосернистого топлива);
- сбор за проход через Суэцкий канал - 50 долларов США
- остаток тарифа включает валютный коэффициент, грузовые операции, расходы на терминал, расходы на безопасность, комиссионные сборы, сезонные сборы, наценки за сверхнормативный вес и т. д.

Дополнительная плата в размере 100 долларов США за контейнер или до 60000 долларов США за судно применяется в связи с пиратской деятельностью в заливе Аден. Обычно этот платеж появляется в документах как плата за безопасность в Аденомском заливе. Точная сумма страховой премии зависит от политики страховой компании.

Для логистической цепи, связывающей северо-восточные провинции Китая с европейскими странами, интерес может представлять следующий маршрут:

- товарный поток из Северо-Восточного Китая в порт Южного Приморья, вероятнее всего в порт Зарубино (Морской порт в бухте Троица);
- в летний период судоходная линия на север от порта Южного Приморья до западного узла Северного морского пути, предположительно Мурманска, а затем наземным транспортом в Европу;
- в зимний период возможно разветвление товарного потока на две цепи - судоходная линия на юг от порта Южного Приморья до Европы через Суэцкий канал для грузов с невысокой удельной стоимостью и на север до Мурманска с полным ледокольным сопровождением для дорогих грузов.

Экономическое обоснование такой схемы требует дополнительного исследования, которое должно ответить на вопрос: поскольку в зимнее время часть портовых перегрузочных мощностей Мурманска будет простаивать, то не приведет ли это к недопустимому удорожанию портовых операций. Возможна также активная эксплуатация Северного морского пути для транзита в зимний период, если организовывать конвои судов из контейнеровозов и СПГ-газовозов, ведомых ледоколом.

Привлечение Мурманска в качестве западного хаба Северного морского пути сократит морскую составляющую до 4000 миль, а время в пути – ориентировочно до 15 суток. Дальнейшая наземная составляющая, в зависимости от нахождения получателя груза, составит до 3000 километров и с учетом преодоления логистических разрывов займет не более 10 суток. Такой маршрут позволит втрое сократить морскую составляющую при незначительном росте наземной перевозки. В результате получаем значительное уменьшение расхода топлива, отсутствие платы за проход Суэцкого канала, сокращение срока доставки вдвое

или более. Однако, потребуется более дорогое судно ледового класса с соответствующим ростом амортизационных отчислений. Прирост стоимости судна при ледовом усилении зависит от проекта и требуемого класса. По некоторым данным, усиление судна до Arc4 увеличивает стоимость на 10% или более. Трудно предсказуемые ледовые условия повышают опасность Северного морского пути. Судно может столкнуться с льдинами и ледяными полями даже в летний сезон. Опасность мореплавания по Северному морскому пути сформировала особые требования к навигации, в том числе - требование ледокольного сопровождения. Действующий тариф на ледокольное сопровождение принят в 2014 году, продемонстрировав переход от запретительного тарифообразования к экономически целесообразному. Тариф на ледокольное сопровождение зависит от ледового класса судна и от длины пути сопровождения. Для судна класса Arc4 регистровой вместимостью 30000 тонн, способного взять на борт 2000 двадцатифутовых контейнеров, ледокольное сопровождение на всем пути будет стоить около 250 тысяч долларов США (или 16 миллионов рублей), что составит примерно 125 долларов на один контейнер. Эта сумма соизмерима со сбором за проход через Суэцкий канал и страховым сбором за проход Аденского залива. В дополнение, особенности тарифных ставок позволяют оптимизировать ледокольный сбор. В результате мы можем ожидать примерно в полтора раза меньшие издержки при перевозке контейнерных грузов через Северный морской путь.

При этом важно отметить, что габарит судна на Северном морском пути будет ограничен шириной канала, который способен обеспечивать ледокол. Даже если судно осуществляет перевозку в летний период и ледокольное сопровождение не обязательно, всегда имеется опасность сдвига ледовых полей по маршруту судна. Ширина действующих ледоколов Росатомфлота (по

конструктивной ватерлинии) 28 метров, перспективных типов ЛК-60Я (проект 22220) и ЛК-110Я (проект 10510), соответственно, 32 и 38 метров. Такие размерения ограничивают максимальную вместимость контейнеровозов примерно четырьмя тысячами контейнеров. Контейнеровоз Panamax вместимостью 4500 контейнеров имеет ширину 32,3 метра и может быть проведен только перспективным ледоколом проекта 10510. Однако, контейнеровозы класса Panamax и выше не имеют ледового усиления, поскольку в настоящее время в таких судах нет потребности.

Заключение

Развитие Северного морского пути чаще всего рассматривают как самостоятельный российский проект. Однако, есть стороны, которые не менее России заинтересованы в реализации этого сложного проекта. Прежде всего, это Китай, который заинтересован в равномерном развитии своей территории и которому необходимо для этой цели снять логистические ограничения для северо-восточных провинций. Но есть и третья заинтересованная сторона.

Понимание правительствами стран Евросоюза зависимой роли от азиатского промышленного центра проявляется в их многочисленных инициативах по защите интеллектуальной собственности и налаживании равноправных партнерских отношений с КНР. Нарастание транспортных издержек будет приводить к росту изолированности стран Евросоюза от азиатского промышленного ядра. Таким образом, важным стратегическим союзником в развитии транзитной транспортной системы России и впоследствии одним из получателей выгод от реализации мегапроекта «Северный морской путь» могут оказаться вовсе не азиатские производители, а третья заинтересованная сторона – страны Евросоюза.

Литература

1. Ван Г. Перспективы Российско-Китайского сотрудничества в области трудовой миграции. // Вестник Томского государственного университета. 2017. № 416. С. 61–68.
2. Иваненко М.А. Реализация транзитного потенциала Российской Федерации на основе развития международных транспортных коридоров // Вестник университета. 2017. № 4. С. 120–124.
3. Останин В.А. Трансграничные Российско-Китайские торговые отношения: эффекты конкуренции и коллаборации // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2018. № 4. С. 10–20.
4. Lazarev V.A., Fisenko A.I. Potential Benefits of Russian Northern Sea Route in Global Supply Chain (Потенциальные выгоды российского Северного морского пути в глобальной цепи поставки) // International Conference on Trends of Technologies and Innovations in Economic and Social Studies 2017. Amsterdam: Atlantis Press, 2017. Pp. 399–404. (на англ.яз.)
5. Qu W., Wang A.X., Da Z.G. Heilongjiang lan pi shu: Heilongjiang jing ji fa zhan bao gao (Синяя книга провинции Хэйлунцзян: Отчет об экономическом развитии провинции Хэйлунцзян (2015)). Beijing: She hui ke xue wen xian chu ban she (Social Sciences Academic Press), 2015. 360 p. (на кит. яз.)

References

1. Van G. Perspektivy Rossiysko-Kitayskogo sotrudnichestva v oblasti trudovoy migratsii [Prospects of Russian-Chinese Cooperation in the Labor Migration Field]. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. № 416. S. 61–68.
2. Ivanenko M.A. Realizatsiya tranzitnogo potentsiala Rossiyskoy Federatsii na osnove razvitiya mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Realization of Transit Capacity of the Russian Federation on the Basis of Development of the International Transport Corridors]. // Vestnik universiteta. 2017. № 4. S. 120–124.
3. Ostanin V.A. Transgranichnye Rossiysko-Kitayskie torgovye otnosheniya: efekty konkurentsii i kollaboratsii [Cross-Border Russian-Chinese Trade Relations: The Effects of Competition and Collaboration]. // Tamozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke. 2018. № 4. S. 10–20.

4. Lazarev V.A., Fisenko A.I. Potential Benefits of Russian Northern Sea Route in Global Supply Chain. In: International Conference on Trends of Technologies and Innovations in Economic and Social Studies 2017. Amsterdam: Atlantis Press, 2017. Pp. 399–404.
5. Qu W., Wang A.X., Da Z.G. Heilongjiang lan pi shu: Heilongjiang jing ji fa zhan bao gao (Heilongjiang Blue Book: Heilongjiang Economic Development Report (2015)). Beijing: She hui ke xue wen xian chu ban she (Social Sciences Academic Press), 2015. 360 p. (In Chinese)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Анатольевич Лазарев, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления морским транспортом, Морской государственный университет им. Г.И.Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, старший научный сотрудник, Институт экономических исследований ДВО РАН, 680042 Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, e-mail: lazarev@msun.ru

Vladimir A. Lazarev, Ph.D (Eng), Associate Professor, Head of Department of Maritime Transport Management, Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, Russia, Verkhneportovaya St., 50A, Higher Senior Researcher, Economic Research Institute, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 680042 Khabarovsk, Russia, Tikhookeanskaya St., 153, e-mail: lazarev@msun.ru

Андрей Иванович Фисенко, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики морского транспорта, Морской государственный университет им. Г.И.Невельского, 690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А, e-mail: fisenko@msun.ru

Andrey I. Fisenko, Dr.Sci (Econ), Professor, Professor of Department of Economics of Maritime Transport, Maritime State University named after G.I. Nevelskoy, 690059 Vladivostok, Russia, Verkhneportovaya St., 50A, e-mail: fisenko@msun.ru

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММDOI 10.37220/MIT.2020.47.1.074
УДК 519.68:15:681.5**Выставка многопозиционной маячной системы на основе траекторных измерений**А.С. Девятисильный¹, В.М. Гриняк^{1,2,3}, А.В. Шурыгин¹, Ю.С. Иваненко³¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, ³Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Рассматривается проблема построения маячной дальномерной системы наблюдения. В статье обсуждается постановка и подходы к решению двухкоординатной задачи выставки (местной координатной привязки) многопозиционной маячной системы, предназначенной для наблюдения подвижных объектов различного целевого назначения (подводных, надводных, наземных, воздушных и др.). Такого рода системы актуальны как для традиционных сфер решения навигационных задач, так и для задач наблюдения нового типа, например, навигация мобильных устройств; в статье моделируется гидроакустическая маячная система, предназначенная для позиционирования подводных аппаратов. Сформулирована математическая модель задачи выставки, основанная на уравнениях типа «состояние-измерение» и конечномерных представлениях метода наименьших квадратов. В силу исходной нелинейности задачи предлагается её линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о состоянии системы наблюдения. Особое внимание в статье уделено вопросу разрешимости задачи в трёх аспектах: принципиальной разрешимости (наблюдаемости), разрешимости в условиях инструментальных погрешностей измерений, разрешимости в условиях конечной точности вычислений. Первый аспект разрешимости интерпретируется полнотой ранга соответствующей системы линейных алгебраических уравнений, второй и третий – обусловленностью задачи и сходимостью итерационной процедуры оценивания. Приведены результаты численного моделирования для типичных ситуаций. Показано, что могут быть достигнуты точности выставки, достаточные для качественного решения широкого круга навигационных задач.

Ключевые слова: маячная система, наблюдение, навигация, выставка, наблюдаемость, дальность.

Adjustment of multiposition observing system of beacons using trajectory measurementsAlexander S. Devyatisilnyi¹, Victor M. Grinyak^{1,2,3}, Artem V. Shurygin¹, Yurii S. Ivanenko³¹Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, ²Vladivostok State University of Economics and Service, ³Far Eastern Federal University

Abstract. Current paper is about problem observation system based on range measurer. The paper discusses the formulation and approaches to the solution of the two-coordinate task of the adjustment (local coordinate binding) of a multi-position system intended for monitoring mobile objects for various special purposes (underwater, surface, air, etc.). The problem of refining the configuration and spatial orientation for a multiposition observing system during a correction of the solution of a navigation problem by the dead reckoning method is considered. The mathematical model of the exhibition problem based on equations of the "state-measurement" type of continuous type and finite-dimensional representations of the method of least squares is formulated. Attention is paid to the problem of resolvability of the problem from the point of view fundamental resolvability (observability) and resolvability under instrumental measurement errors and finite accuracy of machine computations. The question of solvability is discussed. The results of a numerical experiment with the use of simulation models are presented. These results adequately illustrate the possibility of an efficient solution of the problem.

Key words: beacon system, observation, navigation, positioning, observability, conditionality, range.

Introduction

Multiposition systems (MPSs) for observation are of considerable importance for the provision of navigation of different modern moving objects [1–4].

At the same time, the construction of MPSs on their own is also associated with the solution of specific navigational problems that provide a fixation of elements of MPSs (beacons, reference points, and so on) to those reference systems where parameters of the motion objects are estimated during the subsequent use of MPSs.

This paper discusses some questions of the adjustment of an MPS of local action during the realization of a closed procedure, when the identification of parameters of the MPS is performed together with a solution of the navigation problem of an object that

maneuvers in the servicing zone of the MPS. Such adjustment is called dynamic.

It is worth mentioning that in general, this approach to constructing MPSs is not new; it is realized in the construction of modern systems to one extent or another. An example of this is radio navigational satellite systems, whose spatial geometry is identified just through the determination (refinement) of the orbital parameters of artificial navigational Earth satellites in combination with the position of ground observation points [3].

The problem discussed in this paper may be considered as an inverse trajectory problem (ITP) of the kinematic type. The model of the problem includes equations that describe kinematics of a particle (the motion of a real object is identified with its motion) and equations of measurements. Therewith, without loss of generality, only measurements of ranges

(pseudoranges) or differences of “object–beacon” ranges are considered. A problem statement is topical for the organization of the functioning of ground-based radio navigational systems and hydroacoustic systems located at great depths with the use of self-contained submarine apparatuses [2].

Problem statement and model representation

We restrict our consideration to a plane problem and take a look at a system (with N elements) that provides measurement of object–beacon ranges or measurement of the differences in these ranges. Let us introduce the following right orthogonal reference systems: oxy with the origin o , which coincides with one of the beacons (suppose that its number is $j = 1$), and the axis oy directed in a particular way.

The kinematics of the particle in the plane oxy are described by the equations.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V(t)\sin K(t) + W_1(t), x(t_0) = x_0 \\ \dot{y} &= V(t)\cos K(t) + W_2(t), y(t_0) = y_0 \end{aligned} \quad (1)$$

where V is a relative speed, while W_1 and W_2 are the components of translational velocity caused by the motion of the medium:

Let us consider two informational situations. One of them is characterized by the measurements of object–beacon ranges (pseudoranges) of the form

$$\begin{aligned} Z_j(t_i) &= |\tilde{r}_j(t_i)| + d_j + \eta_j(t) \\ j &= \overline{1, J}, J = N, i = \overline{1, L}, \end{aligned} \quad (2)$$

Here, $\tilde{r}_j = \tilde{r} - \tilde{R}_j$, where \tilde{r} and \tilde{R}_j are radius vectors of the object and j th beacon, respectively (therewith, the vectors $\tilde{R}_j, j = \overline{1, N}$ are in errors $\delta\tilde{R}_j = (\varepsilon_j, \nu_j)$; d_j is a small constant caused by an error of time scales for the object and j th beacon; $\eta_j(t_i)$ are instrumental measuring errors, $j = \overline{1, J}, i = \overline{1, L}; N$ is the number of beacons; and L is the number of moments at which the measurements were taken.

Thus, inverse problem described by model ((1), (2)), respectively, with regard to board measurements of V and K are stated. These problems remain to be solved for determining the vector $A = (x, y, \delta K, W_1, W_2, d_j, \varepsilon_j, \nu_j)^T, j = \overline{1, J}$.

When solving this problem, we assume that a supporting trajectory is an object’s mechanical trajectory, which is identified by the measurements V and K given a priori representations of the vectors $(W_1, W_2)^T$ and $(x_0, y_0)^T$ (i.e., a solution of the navigation problem by the traditional method of dead reckoning [5, 6]). Then, one may say about a reduction of initial ITPs to corresponding problems “in the small” with the vector

$$\delta A = (\delta x, \delta y, \delta K, \delta W_1, \delta W_2, d_j, \varepsilon_j, \nu_j)^T, j = \overline{1, J}.$$

Next, the relative boundedness of the space and time domain where the problem is considered, in comparison with space and time characteristics of variability of physical processes that generate translational motion of the object, can be called the predominance of the constant component in the vector W and, correspondingly, the constancy of the vector $\delta W = (\delta W_1, \delta W_2)^T$.

Now, let us move to model of ITPs in the small. In the system oxy we have (1) the equations of measuring discrepancies

$$\begin{aligned} \delta Z_j(t_i) &= \cos \psi_j(t_i) \delta x(t_i) + \sin \psi_j(t_i) \delta y(t_i) \\ &+ (\cos \psi_j(t_i) y(t_i) - \sin \psi_j(t_i) x(t_i)) \delta K \\ &- \cos \psi_j(t_i) \varepsilon_j - \sin \psi_j(t_i) \nu_j + d_j + \eta_j(t_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$j = \overline{1, J}, J = N, i = \overline{1, L},$$

as well as (2) the equations of evolution of errors

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= \delta W_1 + \xi_1, \delta x(t_0) = \delta x_0, \\ \delta \dot{y} &= \delta W_2 + \xi_2, \delta y(t_0) = \delta y_0, \\ \delta \dot{W}_1 &= 0, \delta \dot{W}_2 = 0, \delta \dot{K} = 0, \\ \dot{\varepsilon}_j &= 0, \dot{\nu}_j = 0, \dot{d}_j = 0, j = \overline{1, J}, \end{aligned} \quad (4)$$

where $\xi_1(t) = \Delta W_1 + \Delta V \sin K(t) + \Delta KV(t) \cos k(t)$,

$\xi_2(t) = \Delta W_2 + \Delta V \cos K(t) - \Delta KV(t) \sin K(t)$; $\Delta W_1, \Delta W_2,$

ΔV and ΔK are not simulated components of a translational velocity and instrumental errors of board measurements of relative speed and heading, we accept the hypothesis that they represent independent white noise random processes and possess known mean (zero) and constant intensities $D_{W_1} = D_{W_2} = D_W, D_V, D_K$;

$\eta_j, j = \overline{1, J}$ are instrumental measuring errors, where for

definiteness it is assumed that $M[\eta_j(t_i) \eta_s(t_p)] = \sigma^2 \delta_{js} \delta_{ip}$

; $(x_j, y_j)^T$ is the operator of expectation; δ_{js} and δ_{ip} are Kronecker

deltas; $\cos \psi_j = (x - x_j) / |r_j|$,

$\sin \psi_j = (y - y_j) / |r_j|$, and $|r_j| = ((x - x_j)^2 + (y - y_j)^2)^{1/2}$;

while $(x_j, y_j)^T$ is a vector of position of the j th beacon in the system oxy .

Study of the problem

First, we note that between two models of the ITP considered in the small, we choose the first one described by equations (3) and (4).

Consider the case where ranges (pseudoranges) are to be measured. Let us write a system of equations (3) in terms of a solution of equations of evolution (4) with the initial conditions $x_* = x(t_*)$, $y_* = y(t_*)$ ($\delta x_* = \delta x(t_*)$,

$\delta y_* = \delta y(t_*)$) associated with an arbitrary moment t_* .

Therewith, it should be separately noted that t_* may belong to the interval of measurement as well as lie outside. We have

$$\begin{aligned} \delta Z_j(t_i) &= \cos \psi_j(t_i) \delta x_* + \sin \psi_j(t_i) \delta y_* \\ &+ (y(t_i) \cos \psi_j(t_i) - x(t_i) \sin \psi_j(t_i)) \delta K \\ &+ (t_i - t_*) \cos \psi_j(t_i) \delta W_1 + (t_i - t_*) \sin \psi_j(t_i) \delta W_2 \\ &- \cos \psi_j(t_i) \varepsilon_j - \sin \psi_j(t_i) \nu_j + d_j + q_j(t_i), \end{aligned} \quad (5)$$

$$j = \overline{1, J}; J = N; i = \overline{1, L},$$

where

$$\begin{aligned} q_j(t_i) &= \eta_j(t_i) \\ &+ \cos \psi_j(t_i) \int_{t_*}^{t_i} \xi_1(t) dt + \sin \psi_j(t_i) \int_{t_*}^{t_i} \xi_2(t) dt. \end{aligned}$$

For $J = 1$, the coefficient of δK in equation (5) is zero. Considering the form of the equations of evolution (4), this confirms the fact (also evident from the physical

notion) that if one employs measurements only from the sole beacon, it is meaningless to put δK (which is identified, for example, with an unknown value of magnetic variation, or a constant component of the instrumental error of measurement of the heading) on the list of identified parameters. At the same time, for $J = 1$, in general terms (except trajectories where $\psi_1 = const$), owing to linear independence of the system of time functions $\{\cos\psi(t), \sin\psi(t), t \cos\psi(t), t \sin\psi(t), 1\}$, we observe the vector $(\delta x_s, \delta y_s, \delta W_1, \delta W_2, d_1)^T$, which is of interest for the study of a purely navigational problem.

For $J > 1$, due to the linear independence of the system of time functions that form the elements of the matrix of coefficients for the system of equations (7), we can talk about the possibility of observing the complete vector δA (for instance, in trajectories that are circles with a center in the origin of the reference system oxy for $J = 2$ and $\delta A = (\delta x_s, \delta y_s, \delta W_1, \delta W_2, \delta K, \varepsilon_2, d_1)^T$). In doing so, it would be well to bear in mind that prohibited (not observable) trajectories (say, for $J = 2$, when $\psi_1 = const$ or $\psi_2 = const$ on the interval of observation) may also exist.

In solving the problem of adjustment, its finite dimensional representation (5), associated with two types of used measurements, most readily can be interpreted as the problems of the least-squares method (LS) with the generalized declarative model

$$\delta Z = H\delta A + q, \tag{6}$$

where δZ is a vector of measuring errors, H is a matrix of coefficients, and q is a vector with the components $q_j(t_i)$, $j = \overline{1, J}$, $i = \overline{1, L}$ and with the procedural models

$$H^T Q^{-1} H \delta A = H^T Q^{-1} \delta Z \tag{7}$$

or

$$B^{-1} H \delta A = B^{-1} \delta Z \tag{8}$$

Here, $Q = M[qq^T] = BB^T$.

To represent elements of the matrix Q , we partition its constituent vector q into L vectors $q^{(i)} = q(t_i) = (q_1^T(t_i), q_2^T(t_i), \dots, q_J^T(t_i))^T$, $i = \overline{1, L}$. Then, the matrix Q is partitioned into the blocks $Q^{(is)} = M[q^{(i)} q^{(s)T}]$, $i = \overline{1, L}$, $s = \overline{1, L}$ with the elements $Q_{jk}^{(is)} = M[q_j(t_i) q_k(t_s)]$, $(j, k) = \overline{1, J}$.

In view of what has been aforesaid about nonsimulated components of the problem, we have (for $t_s \notin [t_i, t_s]$, $(i, s) = \overline{1, L}$).

$$\begin{aligned} Q_{jk}^{(is)} = & D_{jk}^{(is)} + \left(D_W + \frac{D_V}{2} \right) (\tau(is) - t_s) (C_j^{(i)} C_k^{(s)} + S_j^{(i)} S_k^{(s)}) + (S_j^{(i)} S_k^{(s)} - C_j^{(i)} C_k^{(s)}) \frac{D_V}{2} \int_{t_i}^{\tau(is)} \cos 2K(t) dt \\ & + (C_j^{(i)} C_k^{(s)} + S_j^{(i)} S_k^{(s)}) \frac{D_K}{2} \int_{t_i}^{\tau(is)} V^2(t) dt \\ & + (C_j^{(i)} C_k^{(s)} - S_j^{(i)} S_k^{(s)}) \frac{D_K}{2} \int_{t_i}^{\tau(is)} V^2(t) \cos 2K(t) dt \\ & + (C_j^{(i)} S_k^{(s)} + S_j^{(i)} C_k^{(s)}) \\ & \times \left[\frac{D_V}{2} \int_{t_i}^{\tau(is)} \sin 2K(t) dt - \frac{D_K}{2} \int_{t_i}^{\tau(is)} V^2(t) \sin 2K(t) dt \right]. \end{aligned} \tag{9}$$

Here, $D_{jk}^{(is)} = \sigma^2$ only for $i = s$ and $j = k$, otherwise

$$D_{jk}^{(is)} = 0; \tau(is) = \operatorname{argmin}_{t_i, t_s} (|t_i - t_s|, |t_s - t_i|);$$

$C_j^{(i)} = \cos \psi_j(t_i)$ and $S_j^{(i)} = \sin \psi_j(t_i)$ in the case of a measurement of ranges, whereas $C_j^{(i)} = \cos \psi_j(t_i) - \cos \psi_1(t_i)$ and

$S_j^{(i)} = \sin \psi_j(t_i) - \sin \psi_1(t_i)$ in the case of measurements of differences of ranges. For $t_s \in [t_i, t_s]$ the corresponding submatrix $Q^{(is)} = 0$.

Now, we write (7) and (8) in the same form

$$\tilde{H} \delta A = \delta \tilde{Z}, \tag{10}$$

every time assigning the corresponding meanings to \tilde{H} and $\delta \tilde{Z}$.

In general, for a constructive solution of the considered problems of adjustment, it is not enough for these problems to be observable (they have this property). A cause of this is that computations are done with a finite accuracy of number representation in a computer, and under these specific conditions a corroboration of a fundamental solvability (observability) in the form of a condition that guarantees the computational stability of a solution of problem (10) is required. For a condition of the sufficient type one may consider the relation $\mu < \mu_*$, where μ is a computed value of the condition number of the operator \tilde{H} and μ_* is a critical number. Specifically, in the solution of the problem with the use of orthogonal Hausholder transformations, this number is determined by the formula [7] $\mu_* = 1 / (k + 11) \varepsilon_1$, where ε_1 is the relative accuracy of the number representation in a computer (say, with the double accuracy of IBM PC we have $\varepsilon_1 \approx 2.2 \times 10^{-16}$, $k = \sqrt{n(2n-3)}(4m+27)$, $n = \dim \delta A$, and $m = LJ$).

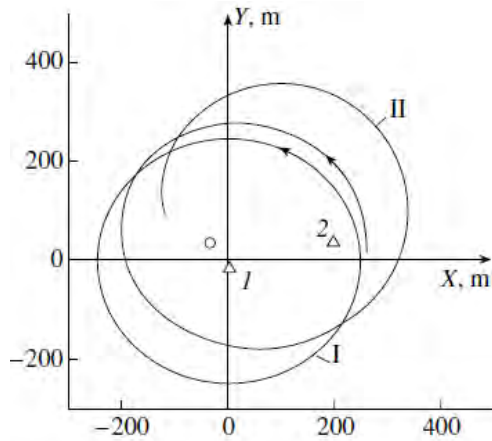


Fig. 1. Trajectories of motion of an underwater object: designed (I) and perturbed (II) trajectories; 1 and 2 are numbers of beacons

If the condition $\mu < \mu_*$ is not fulfilled for a given value of ε_1 , it is reasonable to use a scaling of initial variables, i.e., their transformation in accordance with the rule $\delta \tilde{A} = P \delta A$, where $P = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_m)$. Therewith, the most efficient way of choosing elements $p_i, i = \overline{1, m}$ is

to identify their values with inverse values of Euclidean norms of columns of the matrix \tilde{H} , i.e., $p_i = \|h_i\|^{-1}, i = \overline{1, m}$. Such scaling brings about a result (for μ) that differs from the optimal one no more than by the factor \sqrt{n} [8]; in doing so, the stability of the inverse transition to initial variables is guaranteed [9].

In view of the aforementioned facts, one may say that (8) is the preferred form of a model when compared with (7) although considering the necessity to put forth additional efforts associated with the determination of the matrix B , the popularity of this type of model (especially with a great number of measurements m) can be limited.

Lastly, mention should be made of one more factor, which essentially affects the results of adjustment, namely, initial nonlinearity of the problem and the convergence problem for the iterative procedure (here, we suppose that is based on the least-squares method) under finite measurement accuracy and characterized by the vector q (one iteration is a cycle involving measurements with a subsequent estimation).

Thus, it is necessary to perform numerical experiments to demonstrate real solvability of the considered problem in fairly typical situations. Some results of two such experiments associated with two discussed problems of adjustments are presented below.

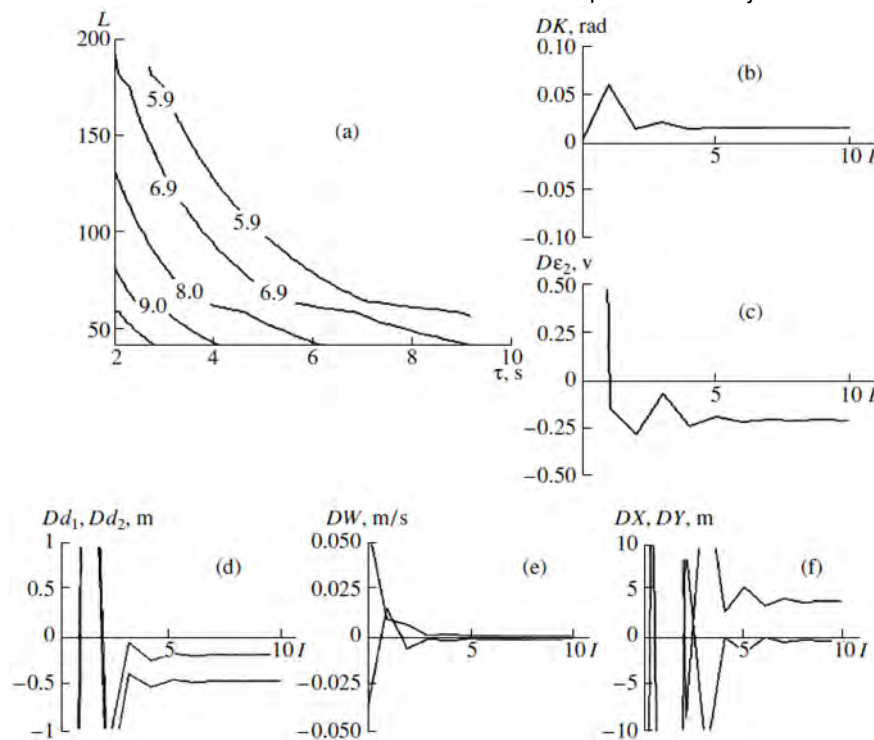


Fig. 2 The case of measurement of distances

The case of two beacons $N = 2$ with coordinates ($x_1 = y_1 = 0$) and ($\tilde{x}_2 = 210 \text{ m}, \tilde{y}_2 = 0$) is considered. Assuming that $W = 0$, the motion along a circle of radius $r_0 = 250 \text{ m}$ from the point ($x_0 = 250 \text{ m}, y_0 = 0$) where $V = 2 \text{ m/s}$ and $K = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{V}{r_0} (t - t_0)$ is designed. Errors of model representations are characterized by the values $\delta x_0 = 10, \delta y_0 = 10 \text{ m}, \delta W_1 = W_1 = 0.1 \text{ m/s}$,

$\delta W_2 = W_2 = 0.1 \text{ m/s}, \varepsilon_1 = v_1 = 0, \varepsilon_2 = 10, v_2 = 0, \delta K = 0.2, \text{ rad} = 12^\circ$, and $d_1 = d_2 = 3 \text{ m}$, whereas the values of nonsimulated components are uniformly distributed on the intervals $\eta \in [-1, 1] \text{ m}, \Delta V \in [-0.2, 0.2] \text{ m/s}, \Delta W_1 \in [-0.1, 0.1] \text{ m/s}$, and $\Delta W_2 \in [-0.1, 0.1] \text{ m/s}$. The presented numerical data are typical, say, for the motion of a submarine apparatus at a great depth [2].

Figure 1 shows two trajectories (for the time interval $[0, 1200]$ s). The designed trajectory (I) is used as an initial approximation in the construction of an iterative procedure for the solution of the problem, and the perturbed one (II) is associated with a model representation of the real motion of an object. As is evident from this figure, the initial representation of the motion of an object rather noticeably disagrees with reality.

Figures 2a demonstrate denary logarithms of condition numbers by columns of normed matrices $\tilde{H} = HQ^{-1}H$ for various values of the numbers L and τ (τ is the time interval between neighboring measurements) and under the condition that the observation interval equal to $L\tau$ is reckoned from the moment $t_0 = 0$.

The other plots in Fig. 2 are constructed for the case $m = JL = 400$, τ equal to 6 and 3 seconds, and $t_* = L\tau$. In this case, the critical value of the condition number (for $\varepsilon_1 = 2.2 \times 10^{-16}$) and the condition number of the matrix \tilde{H} have comparable values of the order 10^{11} . The computer experiment has demonstrated that this eliminates the possibility of a stable solution of corresponding problems in terms of initial variables. As is seen from Fig. 2a, scaling of the variables significantly increases the conditionality of the considered problems and makes them solvable. This is quite conclusively demonstrated by plots in Fig. 2.

The plot demonstrates an acceptable convergence of the iteration procedures and give a good idea of the possibilities associated with the accuracy of a solution of the problem of adjustment. Specifically, the errors of representation are reduced approximately in the following way: from 12° to 1° or the orientation of the system (Fig. 2b); from 10 to 0.05–0.2 m for the beacon's location (Fig. 2c); from 3 to 0.05–0.45 m for errors of time scales (in terms of a range, Fig. 2d); and from 0.1 to 0.005 m/s for components of translational velocity (Fig. 2e). Coordinates of the object at the end of the trajectory are determined with an accuracy of the order of 5 m (Fig. 2f).

Conclusion

Note that in numerical simulation solution of purely navigation problems, the ignorance (in model problems) of perturbing factors dictated by *a priori* errors of adjustment of MPSs taken into account in extended models considered above, results in the fact (under numerical values of perturbations equal to those indicated above) that the iterative procedure (for $N = 2$) converges into a domain of feasible solutions neither in the case of range-finder measurements nor, all the more, in the case of difference range-finder ones [10].

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-07-00132

Литература

1. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. - М.: Радио и связь, 1987.
2. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. Автоматические подводные аппараты. - Л.: Судостроение, 1981.
3. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. - М.: Радио и связь, 1993.
4. Катенин В.А., Дмитриев В.И. Навигационное обеспечение судовождения. - М.: Академкнига, 2006.
5. Девятисильный А.С., Гриняк В.М., Шурыгин А.В. Модели и алгоритмы оценивания кинематических параметров движения объекта по данным его позиционирования // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – №2. – с. 177-182.
6. Дерябин В.В., Сазонов А.Е. Нейро-нечёткая модель счисления пути судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2015. – №4. – С. 1–16.
7. Малышев А.Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. - Новосибирск: Наука, 1991.
8. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. - М.: Наука, 1986.
9. Devyatisil'nyi A.S., Kryzhko I.B. Numerical research of the correction problem of an inertial navigational system // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 1997. – Vol. 36. – Is. 1. – P. 129-133.
10. Grinyak V.M., Devyatisil'nyy A.S. Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 1999. – Vol. 38. – Is. 1. – P. 124-130.

References

1. Kondrat'ev V.S., Kotov A.F., and L.N. Markov. Mnogopozitsionnye radiotekhnicheskie sistemy [Multiposition radio engineering systems]. M.: Radio i svyaz', 1987.
2. Ageev M.D., Kasatkin B.A., and L.V. Kiselev. Avtomaticheskie podvodnye apparaty [Automatic underwater vehicles]. L.: Sudostroenie, 1981.
3. Shebshaevich V.S. Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite radio navigation systems]. M.: Radio i svyaz', 1993.
4. Katenin V.A. and V.I. Dmitriev. Navigatsionnoe obespechenie sudovozhdeniya [Navigation support for navigation], M.: Akademkniga, 2006.
5. Devyatisilny A.S., Grinyak V.M., and A.V. Shurygin. (2018) Models and algorithms of estimation of the kinematic parameters of the object movement by its positioning. Marine Intellectual Technologies. 2. 177-182.
6. Deryabin V.V., and A.E. Sazonov. (2015) Neuro-nechetkaya model' schisleniya puti sudna [Neuro-fuzzy ship dead reckoning model], Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 4. 1–16.
7. Malyshev A.N. Vvedenie v vychislitel'nyuyu lineinuyu algebra [Introduction to Computational Linear Algebra], Novosibirsk: Nauka, 1991.
8. Louson Ch., Khenson R. Chislennoe reshenie zadach metoda naimen'shikh kvadratov [Numerical solution of least squares problems], M.: Nauka, 1986.

9. Devyatisil'nyi A.S., and I.B Kryzhko (1997) Numerical research of the correction problem of an inertial navigational system. Journal of Computer and Systems Sciences International. 36. 129-133.
10. Grinyak V.M., and A.S. Devyatisil'nyj (1999) Dynamic adjustment of multiposition observing system with respect to trajectory measurements. Journal of Computer and Systems Sciences International. 38. 124-130.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Сергеевич Девятисильный, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Alexander S. Devyatisilnyi, Dr. Sci. (Eng), Professor, The head of department of navigation and control, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Radio, 5, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Виктор Михайлович Гриняк, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 190014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Victor M. Grinyak, Dr. Sci. (Eng), The associate, The associate of department of information systems and technologies, Vladivostok State University of Economics and Service, Gogolya, 41, Vladivostok, 690014, Russian Federation, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Артём Владимирович Шурьгин, младший научный сотрудник сектор управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: show.vars@gmail.com

Artem V. Shurygin, junior research fellow of department of navigation and control, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Radio, 5, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: show.vars@gmail.com

Юрий Сергеевич Иваненко, ассистент кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, Дальневосточный федеральный университет, 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: yurown92@yahoo.com

Yurii S. Ivanenko, the assistant of department of applied mathematics, mechanics, control and software, Far Eastern Federal University, Sukhanova, 8, Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: yurown92@yahoo.com



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта www.morintex.ru из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлекцией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации.

Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А. И.

Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**