

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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101

ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
0010100101100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
001101010011010010000101101001010100010010001111100110011001101101011001110000001110010100101
110110011001010111100101010100101001110001011001010011001010111100101011100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
LIBRARY.RU



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



№ 4 (50) Т.1 2020
№4 PART 1 2020



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
0101000110111010010001001110110000101100111010100111010011000101010110101001001100110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 1 2020 Сквозной номер 50

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 журнала <http://morintex.ru> в открытом доступе. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

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

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

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

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ». Тираж 100 экз.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2020



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 1 2020 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2020



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

технический университет, Санкт-Петербург



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ	стр
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Притыкин А.И. Влияние параметров перекрытия типа двойного борта на ширину присоединенного пояса.....	11
Симакина А.А. Исследование влияния вариации модуля Юнга в модели разрушения ледяной балки изгибом.....	18
Готман А.Ш. Расчет остаточного сопротивления судна по теоретическому чертежу.....	24
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Русановский С.А., Худяков М.П., Черенков Н.И. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения. Часть 2 Математическое описание кромок отверстий в сферических и конических участках корпусов.....	41
Ховайко М.В., Осипова А.О., Немов А.С. Расчетное обоснование замены армирующего наполнителя композитного корпуса судна катамаранного типа.....	49
Роннов Е.П., Кочнев Ю.А., Гуляев И.А. Анализ запаса остойчивости судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания.....	56
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Лебедева Е.Г., Сомпольцева А.А. Анализ разработки технологических процессов при изготовлении судовых конструкций.....	61
Зяблов О.К., Кочнев Ю.А., Кочнева И.Б. Концепция автоматизированной подготовки ремонтной документации.....	69
Бимберекв П.А., Токарев А.О., Федотова Е.С. Метод исследования параметров поверхностного упрочнения деталей защитным покрытием.....	75
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Опра Д.П., Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Соколов А.А., Опра К.П., Неумоин А.И., Минаев А.Н. Наноструктурированные материалы на основе диоксида титана в бронзовой модификации для литиевых аккумуляторов в крупногабаритной технике	80
Недоступ А.А., Наумов В.А., Ражев А.О., Дятченко С.В. Уравнения электродинамического подобия траловых лебедок с электрическим приводом.....	87
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Численное определение полей скоростей рабочего тела в камере сгорания судового высокооборотного дизеля.....	92
Руднев Б.И., Повалихина О.В. Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля.....	98
Снявский Н.Я. Корнева И.П., Иванов А.М., Кострикова Н.А. Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света.....	103
Андрющенко С.П., Титов С.В., Юр Г.С. Исследование рабочего процесса дизеля при работе на безводном топливе, грубой и микрогетерогенной водотопливной эмульсии.....	109
Крюков А.А., Чехранов С.В. Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.....	114
Платов А.Ю., Платов Ю.И., Васильева О.Ю. Метод расчета расхода топлива судового дизеля при эксплуатационно-техническом обосновании судов внутреннего плавания.....	121
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	
Мартынов В.Л., Щербакова И.О., Воронин С.В. Автоматизированная сеть сбора данных о техническом состоянии средств навигационного оборудования на радиоперелиниях метеорологической связи в Арктике.....	128

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Скорыходов Д.А., Степанов И.В., Турусова С.Н., Яценко В.В., Хабаров С.П. Интегрированный подход к исследованию рисков в области экологической и пожарной безопасности портовых технологических комплексов..... 135

Фахми Ш.С., Малыгин И.Г., Егоршев С.М., Крылов Ю.Е. Когнитивные транспортные видеосистемы..... 142

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Краснодубец Л.А., Конева С.А., Цалоев В.М. Адаптивный следящий электрогидравлический привод..... 155

Батанина Е.А. Бородин А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан..... 161

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Свистунова А.С., Хасанов Д.С. Возможности автоматических транспортеров-погрузчиков и их использование при создании имитационной модели развития контейнерного терминала..... 169

Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванова Е.В., Палагушкин Б.В., Романов М.Н., Сальников В.Г., Солнцева Е.Н. Узкобазовая промежуточная опора вл 110 кВ из композитных материалов для подхода к перегрузочным терминалам портов..... 175

Денчик Ю.М., Иванова Е.В., Иванов М.Н., Иванов Д.М., Палагушкин Б.В., Романов М.Н., Сальников В.Г., Каскадные отказы опор воздушных линий электропередач как угроза энергетической безопасности прибрежных регионов с суровым климатом..... 180

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Поляков А.С., Таранцев А.А., Кожевин Д.Ф., Каминский В.Ю. Оценка техногенной опасности транспортировки нефти от необорудованного морского побережья в танкеры по гибким трубопроводам рукавного типа..... 186

Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Таранцев А.А., Каминский В.Ю. Пожарная безопасность транспортно-перегрузочных комплексов угля, сжиженных углеводородных газов и нефтепродуктов в морском порту..... 193

Цверов В.В., Бугрова Е.Г., Костров В.Н., Коршунов Д.А. Оценка эффективности снабжения судоходных компаний материально-техническими ресурсами..... 201

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Татаренков Д.А., Рогозинский Г.Г., Малыгин И.Г., Богданов А.В. Применение киберфизических систем для обучения технике безопасности персонала в среде виртуальной реальности на основе синтеза ракурсов в задаче построения морского бортового тренажера..... 209

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Жетесова Г.С., Никонова Т.Ю., Юрченко В.В., Матешов А.К., Савельева Н.А. Создание автоматизированных рабочих мест на основе формализованной методики проектирования технологических процессов машиностроительных предприятий..... 214

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Формы мышления автономных интеллектуальных агентов: особенности и проблемы их организации..... 224

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Оптимизация рыбодобывающей деятельности в многовидовых промысловых системах - промысловых зонах в статическом их состоянии с учетом биотехнологического дуализма (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна).....	231
Дрепин М.А., Гучинский Р.В. Конечно-элементное моделирование разрушения изгибом плавающей ледовой балки.....	239
Балакин А.В., Дядик А.Н., Кармазин А.С., Ларионов М.В., Сурин С.Н. Упрощенная имитационная модель топливного процессора в составе воздухонезависимых энергетических установок.....	245
Белянов И.А., Звягин П.Н. Локализация и исключение бликов на изображениях поверхности моделированного льда.....	251

CONTENTS	page
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Alexej I. Pritykin Influence of parameters of the double hull's grillage on width of associated plate.....	11
Aleksandra A. Simakina Investigation of the influence of elasticity modulus variation in the ice beam bending model.....	18
Ada Sh. Gotman Calculation of the residual resistance of the vessel according to the theoretical drawing.....	24
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Nikolai I. Cherenkov Description of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges. Part 2 Mathematical description of the opening's bevel in spherical and conical sections of hulls.....	41
Mikhail V. Khovaiko, Anna O. Osipova, Alexander S. Nemov Calculations for the filament replacement of the composite hull of a catamaran-type vessel.....	49
Evgeny P. Ronnov, Yury A. Kochnev, Ilya A. Gulyaev Analysis of the ship's stability reserve for inland and mixed (river-sea) navigation.....	56
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Elena G. Lebedeva, Anna A. Sompoltseva Analysis of the development of technological processes in the manufacture of ship structures.....	61
Oleg K. Zyablov, Yury A. Kochnev, Irina B. Kochneva The concept of automated preparation of repair documentation.....	69
Pavel A. Bimberekov, Alexander O. Tokarev, Ekaterina S. Fedotova Method for studying the parameters of the surface hardening of parts with a protective coating.....	75
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Denis P. Opra, Sergey V. Gnedenkov, Sergey L. Sinebryukhov, Alexander A. Sokolov, Kirill P. Opra, Anton I. Neumoin, Alexander N. Minaev Nanostructured materials based on the bronze titanium dioxide for lithium batteries in large-sized engineering	80
Alexander. A. Nedostup, Vladimir. A. Naumov, Aleksey. O. Razhev, Sergey. V. Dyatchenko Equations of electrodynamic similarity of electrically driver trawl winches.....	87
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Numerical determination of the velocity fields of the working medium in the combustion chamber of a marine high-speed diesel engine.....	92
Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina Computational and experimental determination of flame radiation parameters in the combustion chamber of a marine diesel engine.....	98
Nikolay Ya. Sinyavsky, Irina P. Korneva, Andrey M. Ivanov, Natalya A. Kostrikova Research of the oils for ship engine by means of dynamic light scattering method.....	103
Sergei P. Andryushchenko, Sergei V. Titov, Gennadii S. Yur Investigation of the working process of a diesel engine when operating on anhydrous fuel, coarse and micro-heterogeneous water-fuel emulsion....	109
Aleksey A. Krykov, Sergei V. Chekhranov Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel.....	114
Alexander J. Platov, Juri I. Platov, Oksana J. Vasileva Prediction of fuel consumption for marine diesel in feasibility study of inland ship design.....	121
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Victor L. Martynov, Irina O. Shcherbakova, Sergey V. Voronin Automated network for collection of data on technical condition of navigation equipment at meteorological communication radio lines in the Arctic.....	128

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

Dmitriy A. Skorohodov, Ilya V. Stepanov, Sergey N. Turusov, Vladimir V. Yashchenko, Sergey P. Khabarov Integrated approach to the research of risks in the field of ecological and fire safety of port technology complexes.....	135
Shakeeb S. Fahmi, Igor G. Malygin, Sergey M. Egorshv, Yuriy E. Krylov Cognitive transport video systems.....	142

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Leonid A. Krasnodubets, Svetlana A. Koneva, Vladimir M. Tsaloev Adaptive tracking electro-hydraulic drive.....	155
Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan....	161

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Alexandra S. Svistunova, Dmitry S. Khasanov Features of automatic conveyor loaders and their use in creating a simulation model of container terminal development.....	169
Gennadiy A. Danilov, Yullia M. Denchik, Elena V. Ivanova, Boris V. Palaguschkin, Mark N. Romanov, Vasiliy G.Salnikov, Elena N. Solntseva Composite materials made narrow base 110 kV overhead suspension tower for the port terminals approach.....	175
Yullia M. Denchik, Elena V. Ivanova, Michael N. Ivanov, Dmitriy M. Ivanov Boris V. Palaguschkin, Mark N. Romanov, Vasiliy G.Salnikov Cascade failures of the overhead line towers as a threat to the energy security of coastal regions with severe climate.....	180

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Alexandr S. Polyakov, Alexandr A. Tarantsev, Dmitriy F. Kozhevin, Valery Yu. Kaminsky Assessment of the man-induced hazard in transporting oil from the unequipped sea coast to tankers via flexible hose pipelines.....	186
Dmitriy F. Kozhevin, Alexandr S. Polyakov, Alexandr A. Tarantsev, Valery Yu. Kaminsky Fire safety of transshipment terminals for coal, liquefied petroleum gases and oil products in a seaport.....	193
Vladimir V. Tsverov, Ekaterina G. Bugrova, Vladimir N. Kostrov, Dmitrii A. Korshunov Evaluation of efficiency of supply of material and technical resources of shipping companies.....	201

COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

Dmitriy A. Tatarenkov, Gleb G. Rogozinsky, Igor G. Malygin, Alexey V. Bogdanov Application of cyber-physical systems for safety training of personnel of the marine on-board simulator.....	209
--	-----

DESIGNING AUTOMATION SYSTEMS

Gulnara S. Zhetessova, Tatyana Yu. Nikonova, Vasily V. Yurchenko, Arman K. Mateshov, Nadezhda A. Savelyeva Creation of automated workplaces based on a formalized methodology for designing technological processes of machine-building enterprises.....	214
---	-----

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE

Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov Forms of thinking of autonomous intelligent agents: Features and problems of their organization.....	224
--	-----

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko Optimization of fishing activities in multi-species fishing systems - fishing zones in their static state, taking into account biotechnological dualism (on the example of the North Kuril zone of the far Eastern fisheries basin).....	231
Mikhail A. Drepin, Ruslan V. Guchinsky Finite-element modeling of bending failure of floating ice beam	239
Alexej V. Balakin, Aleksander N. Dyadik, Andrej S. Karmazin, Mihail V. Larionov, Sergej N. Surin Simplified imitation model of fuel processor in composition of air-independent power plants.....	245
Iliia A. Belianov, Petr N. Zvyagin Localization and elimination of glare in images of model ice surface....	251

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.4

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.001

Влияние параметров перекрытия типа двойного борта на ширину
присоединенного пояскаА.И. Притыкин^{1,2}¹Калининградский государственный технический университет²Балтийский федеральный университет им. Им. Канта

Аннотация. В балках судовых перекрытий одним из неопределенных элементов является ширина присоединенного пояска. Существующие расчетные зависимости, приводимые в справочных изданиях, далеко не всегда дают верные рекомендации, когда речь идет о балках с присоединенным поясском обшивки. Проблема заключается в том, что при большом пояске распределение напряжений по его ширине носит неравномерный характер, редуцируя его участие в изгибе балки. В Морском Регистре РФ рекомендации, основанные на теоретических разработках, сводятся к размеру присоединенного пояска, равному одной шестой длины балки. При этом параметры перекрытия никакой роли в определении присоединенного пояска не играют. Полученные чисто теоретически с рядом допущений указанные рекомендации могут быть уточнены путем проведения анализа ширины присоединенного пояска с помощью расчета перекрытий типа двойного борта методом конечных элементов. Применение дополнительно к критерию по напряжениям критерия по прогибам позволило более адекватно оценить величину присоединенного пояска, относительная ширина которого имеет тенденцию к возрастанию по мере увеличения расстояния между балками перекрытия. При анализе работы перекрытия варьировались шпация, толщина обшивки и стенок балок, а также высота балок. Полученные МКЭ результаты показали наличие линейной зависимости между относительной шириной присоединенного пояска и относительной шпацией. Отмечено, что увеличение толщины обшивки по сравнению с толщиной стенки практически не оказывает влияния на величину присоединенного пояска.

Ключевые слова: перекрытие, двойной борт, ширина присоединенного пояска, критерии по напряжениям и по прогибам, сосредоточенная сила, распределенная нагрузка, МКЭ

Influence of parameters of the double hull's grillage on width of associated plate

Alexej I. Pritykin^{1,2}¹Kaliningrad State Technical University²Immanuel Kant Baltic Federal University

Abstract. In beams of ship grillages one of unknown elements is width of associated plate. Existence relations, that are included in manuals is not always give true recommendations, when it is need to designate value of associated plate of hull plating. Problem is that under big space between beams stress distribution along the width of beam shelf is not uniform, reducing its participation in the beam deflection. In Maritime Register of Russia based on theoretical works, it is recommended to determine associated plate as 1/6 of beam length, not taking into account parameters of grillage. Obtained by these authors theoretically with some admissions recommendations can be making more precise with analysis of width of associated plate with calculation of grillage of type of double board by the finite element method. Application to addition to criteria on stresses the criteria on deflections allow more precisely evaluate width of associated plate which take tendency to increasing on increasing space between beams of grillage. Analysis of grillage was fulfilled with variation of beam space, thickness of shell and web of beams, and also depth of grillage. Obtained by FEM results show existence of lineal relation between relative width of associated plate and relative space. It is marked the increasing of plate thickness compare to web thickness practically does not influent on value of associated plate.

Key words: grillage, double board, associated plate, stress and deflection criteria, concentrated force, distributed load, FEM.

Введение

При оценке прочности судовых конструкций возникает необходимость определять ширину присоединенного пояска балок. В данной статье рассматриваются перекрытия типа двойного борта, имеющие симметричный профиль относительно нейтральной оси. Ширина обшивки, рассматриваемая в качестве пояска балки при расчете по технической теории изгиба, подразумевает равномерное распределение нормальных напряжений по ширине пояска. Однако известно, что при широком пояске части его, удаленные от стенки балки, не вносят полного вклада в момент сопротивления при изгибе, и балка оказывается слабее, чем это следует из технической теории изгиба. Обычно при определении напряжений

в таких балках за расчетную ширину поясков принимают такую величину a_n , чтобы техническая теория, примененная к приведенному сечению, давала корректные значения максимальных напряжений изгиба.

Решением задачи о нахождении a_n занимались такие известные ученые, как П.Ф. Папкович [1] и С.П. Тимошенко [2] еще в первой половине прошлого века. В книге П.Ф. Папковича [1] функция напряжений в пояске балки отыскивалась в рядах Фурье с помощью решения Файлона для свободно опертой (с. о.) балки и решения Рибьера для жесткой защемленной (ж. з.) балки. Решая бигармоническое уравнение, П.Ф. Папкович пришел к выводу, что для случая ж. з. балки ширина присоединенного пояска

a_n получается равной либо его фактической ширине, либо одной шестой пролета балки, в зависимости от того, что меньше, а для с.о. балки величину a_n он рекомендовал принимать равной одной третьей пролета. При этом в [1] отмечалось, что данные рекомендации являются весьма грубыми, основанными на ряде допущений, не всегда соответствующих реальным условиям деформации, поэтому пользоваться ими надо с большой осторожностью, уточняя в необходимых случаях дополнительными численными расчетами.

Позднее С.П. Тимошенко и Дж. Гудьер [2] применили к двумерной задаче теории упругости для прямоугольной пластины, нагруженной только касательными напряжениями на одной из кромок, то же решение Рибьера, минимизируя затем энергию деформации изгиба балки. Представляя функцию напряжений в форме экспоненциально убывающей кривой (рис.1), авторы [2] после ряда допущений пришли к выражению для величины a_n ж. з. балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, в виде

$$a_n = 2l / (\pi(3 + 2\nu - \nu^2)), \quad (1)$$

где l – пролет балки; ν – коэффициент Пуассона.

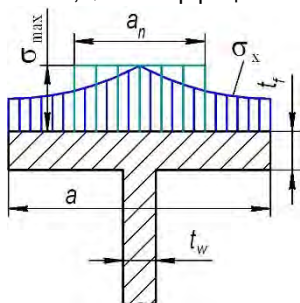


Рис.1. Характер распределения напряжений в балке с широким пояском

Подставив в (1) величину $\nu = 0.3$, авторы [2] получили $a_n \approx 0.181l$. Для случая ж. з. балки, нагруженной сосредоточенной силой посередине пролета, ширина a_n получилась равной $a_n \approx 0.154l$.

В Морском Регистре РФ [3] в качестве ширины присоединенного пояска балок перекрытий принята величина $a_n = l/6$. В германском Ллойде [4] ширину a_n рекомендуется принимать в зависимости от вида нагружения и характера закрепления балки, причем эта величина может варьироваться в широком диапазоне. В работе [5] величина a_n исследовалась для варианта перекрытия с двумя пересекающимися балками, а в работах [6, 7] присоединенный поясок изучался при упругопластическом деформировании балок.

В данной статье ставилась задача проверить полученные в работах [1, 2] теоретические результаты методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS на перекрытиях

типа двойного борта с системой балок одного направления.

1. Оценка ширины присоединенного пояска

Для удобства будем обозначать симметричное по высоте перекрытие в виде $l - n \cdot a - h_w - t_w - t_f - \varepsilon$, где l – длина; $n \cdot a$ – ширина перекрытия (n – число балок, a – шпация); h_w – высота стенки балок перекрытия, измеряемая между осями поясков; t_w – толщина стенки балок; t_f – толщина поясков балок, т. е. наружной обшивки и второго борта, которые принимаем одинаковыми; ε – коэффициент опорной пары закрепления балок на контуре: $\varepsilon = 0$ – свободное опирание, $\varepsilon = 1$ – жесткая заделка.

Оценка величины a_n производилась для нескольких вариантов конструктивного оформления перекрытия с варьированием: высоты перекрытия; соотношения толщин стенки и поясков; расстояния между балками (шпация); опирания по контуру – шарнирное или жесткая заделка; вида нагружения – равномерно распределенная нагрузка или сосредоточенная сила. Проверялось также влияние коэффициента Пуассона на ширину пояска a_n . При нагружении перекрытия сосредоточенными силами F последние прикладывались посередине пролета каждой из балок. С целью соответствия расчету МКЭ теоретическому решению, приведенному в [1, 2], нагружение равномерно распределенной нагрузкой q осуществлялось по линиям вдоль стенок каждой балки для исключения дополнительного изгиба обшивки.

Поскольку напряженно-деформированное состояние балки характеризуется двумя параметрами – напряжениями и прогибами, то в качестве критериев для определения величины a_n применялся как критерий по напряжениям, так и критерий по прогибам. Критерий по напряжениям использовался аналогично тому, как это сделано в работах [1, 2], т. е. на основании полученного МКЭ фактического распределения напряжений по ширине полки величина a_n определялась делением площади эпюры напряжений на максимальное их значение в полке в районе пересечения со стенкой (рис.1)

$$a_n = A_\sigma / \sigma_{\max}, \quad (2)$$

где A_σ – площадь эпюры напряжений, которую можно вычислить, например, по методу трапеций.

Для исключения местных эффектов при нагружении сосредоточенной силой напряжения σ_x определялись только в ненагруженном пояске. В дополнение к критерию по напряжениям был принят и критерий по прогибам, в котором определение ширины a_n производилось приравнением прогиба

w_{\max}^{FEM} , полученного расчетом МКЭ, теоретическому значению, вычисленному по технической теории (ТТ)

изгиба балки $w_{изгиб}^{TT}$, дополненному деформацией сдвига $w_{сдвиг}^{TT}$. Так, прогиб с. о. балки под действием сосредоточенной силы F согласно технической теории изгиба имеет вид

$$w_{изгиб}^{TT} = Fl^3 / 48EI, \quad (3)$$

где момент инерции сечения I для балки с симметричными поясками определяется как

$$I = 0.5h_w^3 t_w (a_n t_f / h_w t_w + 1/6). \quad (4)$$

Деформация сдвига для случая с. о. балки под действием силы F будет [8]

$$w_{сдвиг}^{TT} = Fl / 4GA_w, \quad (5)$$

где $A_w = h_w t_w$ - площадь стенки, $G = E / 2(1 + \nu)$ - модуль сдвига.

Приравняв сумму величин (3) и (5) с учетом (4) значению $w_{max}^{МКЭ}$, приходим к соотношению для $a_{w,0,F}$ в виде

$$a_{w,0,F} = (Fl^3 / (48E(w_{max}^{FEM} - 0.25Fl / GA_w))) / ((0.5h_w^2 A_w) - 0.167) A_w / t_f. \quad (6)$$

Для случая жесткой заделки прогиб балки под действием сосредоточенной силы запишется как [8]

$$w_{max}^{TT} = Fl^3 / 192EI, \quad (7)$$

а компонента прогиба, обусловленная сдвигом, остается та же (5), так как характер закрепления балки на компоненту сдвига не влияет. Тогда с учетом (7) выражение для $a_n^{поз}$ в случае жесткой заделки будет

$$a_{w,1,F} = ((Fl^3 / (192E(w_{max}^{FEM} - 0.25Fl / GA_w))) / ((0.5h_w^2 A_w) - 0.167) A_w / t_f). \quad (8)$$

Индексы 0 и 1 в зависимостях (6) и (8) указывает на характер закрепления контура перекрытия – с. о. или ж. з. соответственно. Индекс F указывает на нагружение сосредоточенными силами. Первый индекс w или σ указывает, по какому критерию вычислялись величины a_n . Определять значения (2), (6) и (8) будем, используя расчеты МКЭ. Аналогичным образом определялись величины $a_{w,\varepsilon,q}$ и $a_{\sigma,\varepsilon,q}$ для вариантов нагружения распределенной нагрузкой q .

2. Результаты расчетов МКЭ

В расчетах МКЭ с помощью комплекса ANSYS использовались четырехугольные элементы Shell63 с шестью степенями свободы в каждом узле. Размеры элементов зависели от высоты шпангоутов и принимались равными $\Delta_{КЭ} = 0.1h_w$. Свободное

опирание обеспечивалось закреплением контурных узлов, расположенных по периметрам наружной и внутренней обшивки перекрытия (рис.2в).

Предварительные расчеты показали, что при наличии только трех балок наблюдается краевой эффект в виде депланации крайних балок, который проявляется при малых шпациях, поэтому был выбран вариант с пятью балками, где средняя балка лишена влияния краевого эффекта. Шпация варьировалась в диапазоне $l/12 \leq a \leq l/4$, высота стенок балок принимала значения в пределах $l/37.5 \leq h_w \leq l/12.5$. Соотношение толщин

поясков t_f и стенок балок t_w изменялось в диапазоне $0.7 \leq t_f / t_w \leq 2.5$. Нагружение

осуществлялось либо пятью силами $F = 20кН$, приложенными к каждой балке посередине пролета, либо распределенной по длине каждой балки нагрузкой $q = 2.66кН / м$. Величина q была принята такой, чтобы суммарная нагрузка на балку равнялась 20кН для удобства сравнения с сосредоточенной силой. Результаты расчета с. о. перекрытия $750 - 5 \cdot 125 - 40 - 0.4 - 1см - 0$ (рис.2а) показали,

что нормальные напряжения σ_x по ширине a пояска средней балки уменьшаются по мере удаления от стенки почти в 1.4 раза. Согласно (2) при фактической шпации $a = l/6 = 125см$ ширина присоединенного пояска составит величину

$a_{\sigma,0,F} = 0.134l$. Вычисление же величины $a_{w,0,F}$ по прогибу (6) (рис.2б), приводит к значению

$a_{w,0,F} = 0.15l$, которое почти на 12% больше, чем полученное по напряжениям. Причина такого расхождения объясняется наличием локального эффекта, обусловленного действием сосредоточенной силы. Если распределение напряжений σ_x рассматривать не под силой F при

$x = 0.5l$, а в сечении $x = 0.46l$, то оно окажется более равномерным и величина $a_{\sigma,0,F}$ в этом случае примет значение $0.153l$, т. е. расхождение снижается до 2%. Поэтому в дальнейшем использовались оба критерия для взаимной проверки результатов.

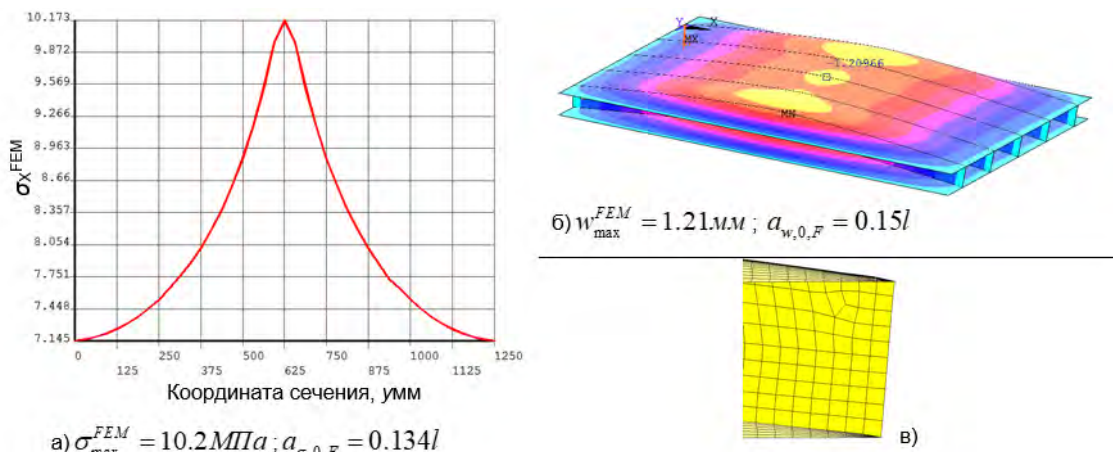


Рис.2. Расчет с. о. перекрытия 750–5·125–40–0.4–1см–0 при F = 20кН :

а) напряжения σ_x при $x = 0.5l$; б) прогиб перекрытия; в) деформация с. о. кромки перекрытия

Аналогичные расчеты, выполненные для этого перекрытия при варьировании шпации в диапазоне $l/12 \leq a \leq l/4$, позволили получить данные, приведенные в табл.1, где указаны прогибы и

относительные значения присоединенных поясков $a_{\sigma,0,F} / l$ и $a_{\sigma,0,F} / a$, вычисленные по отношению к длине балки и шпации перекрытия.

Таблица 1

Присоединенные пояски балок с. о. перекрытия при действии сосредоточенных сил

Параметры перекрытия	750–5·a–40–0.4–1см, F=20кН					
	l/12	l/10	l/8	l/6	l/5	l/4
Шпация, a	l/12	l/10	l/8	l/6	l/5	l/4
w_{\max}^{FEM} , мм	1,78	1,63	1,44	1,20	1,085	0,954
$a_{\sigma,0,F} / a$	0,972	0,967	0,951	0,918	0,883	0,831
$a_{\sigma,0,F} / l$	0,0812	0,0967	0,119	0,153	0,177	0,208
$a_{w,0,F} / a$	1,09	1,01	0,942	0,889	0,86	0,832
$a_{w,0,F} / l$	0,0907	0,101	0,118	0,150	0,172	0,208

Анализ полученных значений показал, что между относительной шириной присоединенного пояска a_n / l и относительной шпацией a / l существует линейная (или близкая к ней) зависимость (рис.3а). Значения $a_{\sigma,0,F} / a$ (рис.3б) показывают,

что даже при шпации $a = l/12$ величина присоединенного пояска $a_{\sigma,0,F}$ оказывается чуть меньше шпации.

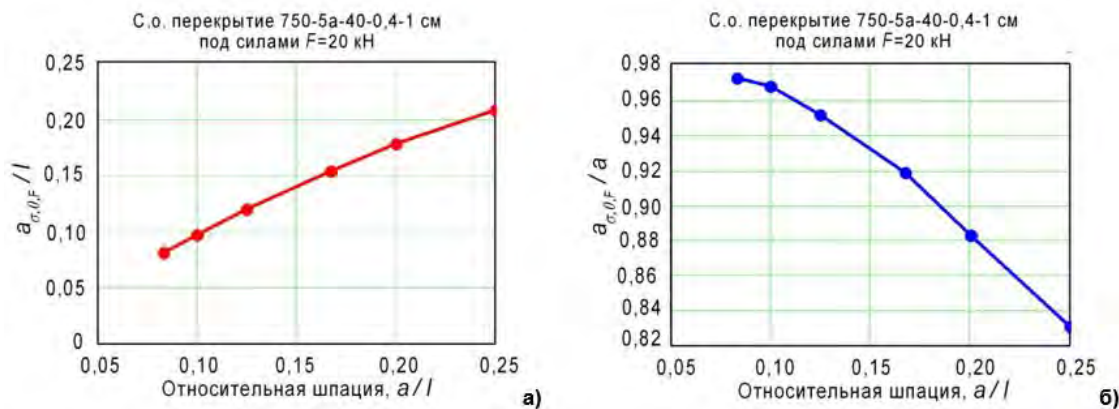


Рис.3. Присоединенные пояски балок с. о. перекрытия в функции от a / l : а) $a_{\sigma,0,F} / l$; б) $a_{\sigma,0,F} / a$

В аналитической форме зависимость для $a_{\sigma,0,F} / l$ от a / l в линейной аппроксимации при $l / h_w = 18.75$ можно представить в виде

$$a_{\sigma,0,F} / l = 0.765a / l + 0.0211. \quad (9)$$

Увеличение высоты стенки балок в 1.5 раза до $h_w = 60 \text{ см}$, приводит к незначительному снижению относительной ширины присоединенного пояска a_n / l (табл.2), отличающейся от варианта с $h_w = 40 \text{ см}$ (табл.1) на 1.5-4.7%.

Таблица 2

Зависимость относительной ширины $a_{w,0,F} / l$ от a при высоте с. о. перекрытия $h_w = 60 \text{ см}$

Шпация, a	$l/12$	$l/10$	$l/8$	$l/6$	$l/5$	$l/4$
W_{\max}^{FEM} , мм	0,878	0,794	0,704	0,604	0,55	0,494
$a_{w,0,F} / l$	0,085	0,0979	0,116	0,146	0,169	0,201

Вариация соотношения толщин поясков и стенок балок в диапазоне $0.7 \leq t_f / t_w \leq 2.5$ для с. о. перекрытия указывает на незначительное колебание величины a_n в

пределах 0.1-0.5%, причем с уменьшением t_f / t_w наблюдается некоторое уменьшение $a_{w,0,F} / l$.

Аналогичные расчеты вариантов перекрытия с жесткой заделкой по контуру указывают на снижение при одинаковой высоте стенки и шпации величины $a_{\sigma,1,F} / l$ по сравнению с вариантом шарнирного опирания (рис.4а) на 10-36%. Больше снижение относится к перекрытию с большей шпацией. Величину $a_{\sigma,1,F} / l$ для ж. з. перекрытия при сосредоточенных силах можно аппроксимировать зависимостью

$$a_{\sigma,1,F} / l = 0.368a / l + 0.0453. \quad (10)$$

Рассмотрение вариантов напряженно-деформированного состояния с. о. и ж. з. перекрытий при равномерно распределенной нагрузке,

приложенной вдоль стенок балок, показало более равномерное распределение напряжений по ширине поясков с меньшим перепадом их значений, что приводит к возрастанию величин a_{σ} / l , как это и указывалось в работе [2]. Для с. о. перекрытия величина присоединенного пояска по напряжениям может быть описана как

$$a_{\sigma,0,q} / l = 0.904a / l + 0.0078. \quad (11)$$

Для случая жесткой заделки контура эта же зависимость примет вид

$$a_{\sigma,1,q} / l = 0.731a / l + 0.0236. \quad (12)$$

Сравнение результатов (11) и (12) показывает, что наличие жесткой заделки снижает величину $a_{\sigma,1,q} / l$ на 10% при $a / l \geq 0.2$ (рис.4б).

Расчет перекрытия при разном коэффициенте Пуассона показал, что при уменьшении величины ν с 0.3 до 0.2 эффективная ширина пояска по расчету МКЭ увеличится в 1.02 раза, а не в 1.047, как это следует из (1).

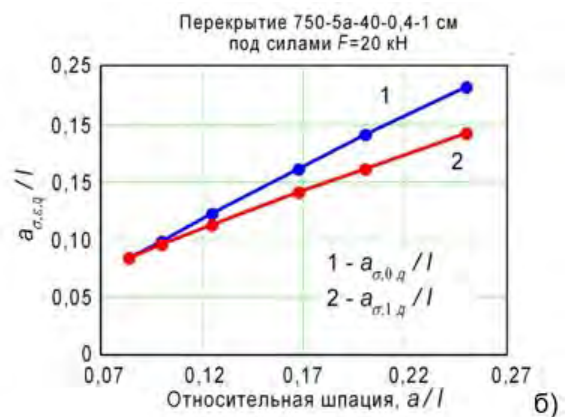
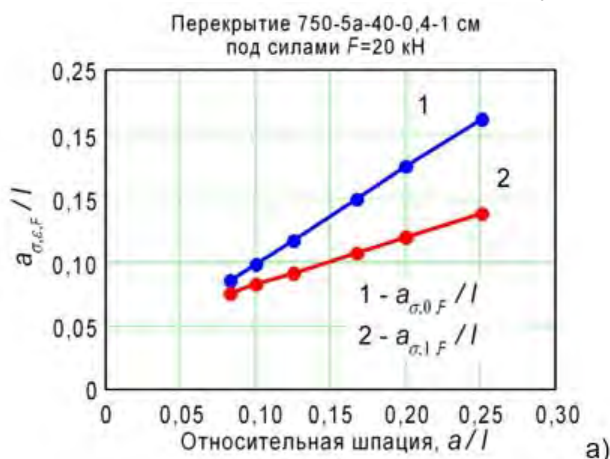


Рис. 4. Влияние характера закрепления контура перекрытия: а) на величину $a_{\sigma,\varepsilon,F} / l$; б) на величину $a_{\sigma,\varepsilon,q} / l$

Из рис.4а и рис.4б следует, что при нагружении ж.з. перекрытия как сосредоточенными силами, так и равномерно распределенной нагрузкой ширина

присоединенного пояска $a_{\sigma,1} / l$ оказывается меньше, чем при с.о. Причем при нагружении силами

снижение оказывается существенно больше, чем при распределенной нагрузке.

Проведенный анализ показал, что полученные в работах [1, 2] теоретические результаты качественно согласуются с данными МКЭ, т. е. к снижению величины a_n приводит как наличие жесткой заделки вместо свободного опирания, так и действие

сосредоточенной силы вместо распределенной нагрузки.

Сопоставление полученных МКЭ результатов с рекомендациями германского Ллойда [4] показывает (рис.5а), что для варианта с. о. перекрытия при распределенной нагрузке q величины присоединенных поясков практически совпадают. Для варианта ж. з. перекрытия рекомендации [4] оказываются существенно заниженными (рис.5б).

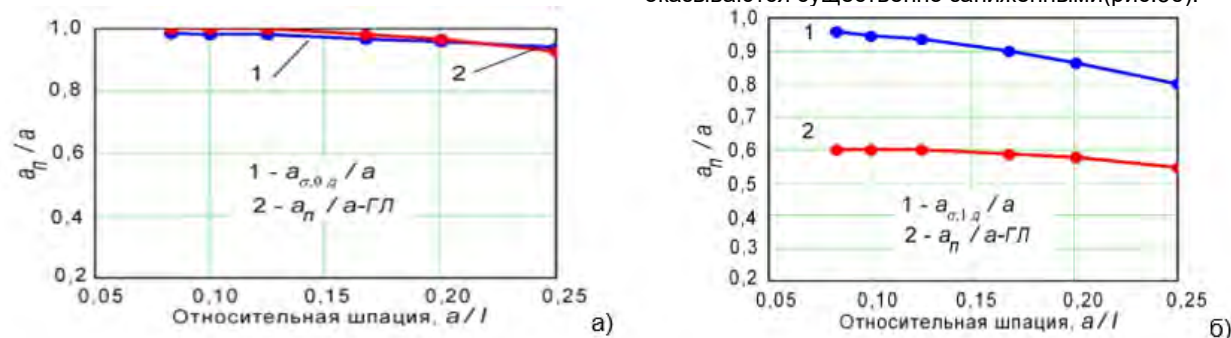


Рис.5. Сравнение величин $a_{\sigma, \epsilon, q} / a$, полученных в данной работе, и рекомендаций германского Ллойда:

а) для с.о. перекрытия; б) для ж. з. перекрытия

Заключение

Оценку относительной ширины присоединенного пояска балок перекрытий типа двойного борта при разных условиях опирания в функции от a/l можно производить по зависимостям (9), (10) для варианта нагружения сосредоточенными силами и по зависимостям (11), (12) при действии распределенной нагрузки.

Теоретические результаты работ [1, 2] качественно согласуются с данными МКЭ.

При значениях шпации $a \leq l/9$ ширину пояска можно принимать равной шпации.

При жесткой заделке контура величина $a_{\sigma, 1, q} / l$ оказывается на 5-10% меньше, чем для с. о. перекрытия в диапазоне $1/9 \leq a/l \leq 1/4$ при действии распределенной нагрузки. Для случая приложения сосредоточенных сил это расхождение достигает 10-36%, возрастая с увеличением a/l .

Нагружение балок перекрытия сосредоточенными силами приводит к небольшому снижению ширины присоединенного пояска по

сравнению с вариантом приложения распределенной нагрузки.

При увеличении относительной высоты балок перекрытия h_w/l с 0.0533 до 0.08 наблюдается тенденция к незначительному росту присоединенного пояска в пределах 1-5%, которая с уменьшением шпации до $a < l/12$ исчезает.

Изменение соотношения толщины пояска и стенки балки t_f/t_w с 0.7 до 2.5 практически не сказывается на ширине присоединенного пояска

При использовании критерия по прогибам надо принимать в расчет деформацию стенки от сдвига.

Рекомендации германского Ллойда для случая ж. з. перекрытия приводят к заниженной примерно на 30% величине a_n .

Требования российского Морского Регистра к нормированию ширины присоединенных поясков могут быть усовершенствованы.

Литература

1. Папкович П.Ф. Теория упругости. – Л.-М.: Госиздат оборонной промышленности. -1939. 640с.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука.-1979. 560с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский Морской Регистр судоходства. – СПб.: РМРС, 2018.– 209 с.
4. Германский Ллойд. Правила классификации и постройки морских судов. – Санкт-Петербург: Германишер Ллойд, 2007.- 300с.
5. Притыкин А.И., Бугакова Н.Ю., Мороз В.С. Об оценке присоединенного пояска балок судовых перекрытий // Морские интеллектуальные технологии. №4, т.4. 2019, с.24-29.
6. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Предельное состояние жестко пластичной балки в виде несимметричного двутавра при комбинированном нагружении // Морские интеллектуальные технологии. №2(28), т.1. 2015, с. 26–34.
7. Притыкин А.И. Анализ упругопластического деформирования балок с присоединенным пояском МКЭ // Морские интеллектуальные технологии. №2, т.1. 2020, с.27-33.
8. Справочник по строительной механике корабля. Т.1. /Под ред. Паляя О.М. –Судостроение. 1982.376с.

References

1. Papkovich P.F. Teoria uprugosti [Theory of elasticity]. – L.-M.: Gosizdat oboronnoj promyshlennosti. -1939. 640с.
2. Timoshenko S.P., Goodier J. Teoria uprugosti [Theory of elasticity]. – M.: Nauka. -1979. 560с.
3. Pravila klassifikacii i postroiки morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Rossiiskij morskoi registr sudokhodstva, 2018. 209 p.
4. Germanskij Lloid. Pravila klassifikacii i postroiки morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. – Sanct-Peterburg: GermanisherLloid, 2007.- 300с.
5. Pritykin A.I., Bugakova N.U., Moroz V.S. Ob ozenke prisoedinennogo pojaska balok sudovh perekrytij [Estimation of attached band of bottom grillages beams]. //Morskie intellektual'nye tekhnologii № 4 part 4, 2019, с.24-29.
6. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Predel'noe sostoianie zhestko plastichnoj balki v vide nesimmetrichnogo dvutavra pri kombinirovannom nagruzhenii [Ultimate state of an asymmetric double tee stiff plastic beam section under combined loading] Morskie intellektual'nye tekhnologii. №2(28), т.1. 2015, с. 26–34.
7. Pritykin A.I. Analiz uprugoplasticheskogo deformirovaniya balok s prisoedinennym pojaskom MKE [Analysis by FEM of elasto-plastic deformation of beams with associated plate]//Morskie intellektual'nye tekhnologii.№ 2 part 1, 2020, с.27-33.
8. Spravochnik po stroitel'noj mekhanike korablia [Manual on Structural mechanics of ship]. V.1. /Under edit. of O.M. Paliy. Sudostroenie. 1982. 376p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Игоревич Притыкин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения, декан факультета «Судостроение и энергетика», Калининградский государственный технический университет 236016, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

Alexej I. Pritykin, Dr.Sci.(Eng), associate professor, professor of the department of shipbuilding, dean of the shipbuilding and energy faculty, Kaliningrad State Technical University, 236016, Kaliningrad, Sovietskijave., 1, e-mail: prit_alex@mail.ru

УДК 539.3

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.002

Исследование влияния вариации модуля Юнга в модели разрушения ледяной балки изгибом

А.А. Симакина¹¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. В работе исследуется влияние неравномерности распределения модуля Юнга в ледяной клавише при ее взаимодействии с наклонным сооружением. Неоднородности в модели отдельно рассматриваются по длине и толщине клавиши. Изменение модуля Юнга по толщине происходит, как правило, в связи с температурным градиентом. При этом лед рассматривается как слоистая балка, в каждом слое которой физико-механические свойства остаются постоянными. При изменении модуля Юнга по длине клавиши рассматривается как простая линейная зависимость, так и представление его как случайной величины. Проведено сравнение результирующих параметров разрушения балки при перечисленных постановках задачи. При помощи статистического моделирования получены кривые, определяющие при различных величинах разброса модуля Юнга границы интервала, в которые значения точек разлома попадают с вероятностью 95%.

Ключевые слова: изгиб льда, наклонное сооружения, неоднородность по толщине, неоднородность по длине, разрушение льда, изменение модуля Юнга.

Investigation of the influence of elasticity modulus variation in the ice beam bending model

Aleksandra A. Simakina¹¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

Abstract. The paper investigates the influence of uneven distribution of Young's modulus in an ice beam during its interaction with an inclined structure. Inhomogeneities in the model considered separately along the length and along the height. The change in Young's modulus along the width occurs in connection with the temperature gradient, when viewed as a layered beam. In each layer of the beam, the physical and mechanical properties of ice remain constant. When Young's modulus is changing along the beam length, its representation is considered as a random variable. The comparison is made of the values of the system parameters with and without taking into account inhomogeneities in the model along the length and width. The study involved a series of numerical experiments to determine the dependence of the standard deviation value of Young's modulus and the interval boundaries in which the values of the breaking point falls with a probability of 95%.

Key words: ice bending, inclined structures, height heterogeneity, length heterogeneity, Young's modulus distribution, ice breaking.

Введение

При формировании льда в нем возникают различные неоднородности, создающие дополнительные напряжения и влекущие к образованию трещин и разрушению ледяного покрова. Во льду возможно появление микродефектов, связанных с возникновением градиента параметров вследствие различных возмущений при формировании льда. Для составления модели, описывающей поведение льда с микродефектами, необходимо задать распределение параметров в каждой точке тела [1].

Для определения внутренних параметров ледяного покрова проводится серия экспериментов в ледовом бассейне. На выходе испытаний получается набор значений для некоторых точек, по которым можно определить средние значения параметров модели. Но по нескольким измерениям невозможно точно определить распределении параметров во всем льду. Для этого необходимо провести большее количество испытаний, требующих большее количество времени. Но за время их проведения в бассейне могут измениться внешние условия (изменение температуры, вибрации и другие факторы), что изменит значение параметров. При невозможности точного измерения параметров в каждой точке, можно представить значения этих параметров в качестве реализаций случайных величин. Такое представление позволяет оценить

возможное отклонения аналитического значения параметров от экспериментальных.

При проведении испытаний во льду наблюдается градиент температуры по его толщине, вследствие нахождения части льда под водой. Это влечет за собой изменение внутренних параметров не только по длине, но и по толщине ледяного покрова. Для учета этой неоднородности можно разбить лед на подслои, в каждом из которых будет наблюдаться свое изменение параметров. В пределах толщины каждого из рассматриваемых слоев физико-механические свойства льда остаются постоянными. Ранее предпринимались попытки рассмотрения такого вида неоднородности балки [4,5,6], но в этих работах рассматривалось лишь несколько слоев и были рассмотрены контактные подслои, которые не наблюдаются во льду в силу его непрерывности.

Для оценки влияния возмущения параметров, на полученные решения, можно рассмотреть взаимодействия льда и наклонного сооружения. Это взаимодействие, наиболее часто встречается в ледотехнике, в силу наличия большого количества наклонных поверхностей у кораблей, барж и различных морских конструкций. Оно ранее было рассмотрено многими авторами [7], [8] но не учитывало возможный разброс внутренних параметров по длине и толщине ледяного покрова.

1. Изотропный лед

Рассмотрим общую задачу о взаимодействии полу бесконечной клавиши изотропного льда и наклонного сооружения. При их взаимодействии происходит изгиб льда и возникают напряжения, приводящие к возникновению трещины и разрушению ледяного покрова.

При контакте тел образуется нормальная сила N , перпендикулярная контактной поверхности и сила трения S . Силы раскладываются на две проекции по вертикали V и горизонтали H (рис. 1).

$$\begin{aligned} H &= N \cos \varphi + S \sin \varphi \\ V &= N \sin \varphi - S \cos \varphi \\ S &= \mu N \end{aligned} \quad (1)$$

где μ - коэффициент трения, φ - угол наклона сооружения.

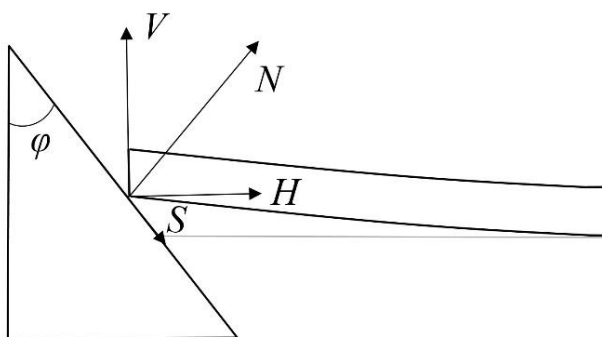


Рис.1 Силы и их проекции в точке контакта

В модели лед принимается, как балка с постоянным сечением, лежащая на упругом основании с постоянной жесткостью. Будем рассматривать случай плоской деформации, тогда уравнение прогиба принимает следующий вид:

$$E_0 I_0 w^{IV} + bkw = 0 \quad (2)$$

где E_0 - модуль Юнга изотропного льда, I_0 - момент инерции изотропного льда, b - ширина клавиши.

Так как роль упругого основания принимает вода, жесткость для нее будет зависеть от удельной плотности воды и силы тяжести.

$$k = \rho_{water} g \quad (3)$$

При взаимодействии льда и наклонного сооружения на левый край балки действует перерезывающая сила V и сосредоточенный момент, создаваемый горизонтальной силой H . Предполагается, что в ходе взаимодействия балки и наклонного сооружения не происходит смятие и горизонтальная сила приложена к нижней грани балки. Так как пластина не ограничена по направлению x на бесконечности, прогиб в ней будет отсутствовать. Тогда граничные условия для уравнения (2) записываются в виде:

$$w'''(0) = V, w''(0) = -H \frac{h}{2}, w(x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0 \quad (4)$$

При решении уравнения (2) с граничными условиями (4) получается уравнение прогиба балки, лежащей на упругом основании:

$$w(x) = \frac{2\alpha}{k} e^{-\alpha x} ((V + \alpha M) \cos(\alpha x) - \alpha M \sin(\alpha x)) \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_0 I_0}}$$

2. Неоднородность льда по толщине клавиши

В эксперименте часть льда погружена в воду и находится при температуре близкой к 0°C , а часть находится на воздухе при отрицательной температуре. Из-за разных внешних условий во льду наблюдается градиент параметров по толщине клавиши. При этом более холодные верхние слои будут прочнее, чем нижние.

Для описания модели с распределением параметров по толщине, лед представляется как слоистая балка, лежащая на упругом основании. При этом предполагается дискретное распределение параметров по слоям. В дальнейшем, при устремлении количества слоев к бесконечности, получается непрерывный случай.

Воспользуемся дифференциальными уравнениями равновесия, связывающие напряжения в теле и уравнение для нахождения нормальных напряжений в каждом слое.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_x^{(k)} = \frac{E_k M_z}{D_n} y = E_k \left(-\frac{d^2 w}{dx^2} \right) y$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ - напряжения, возникающие в сечении, E_k - модуль Юнга k слоя, M_z - момент, возникающий в сечении, - приведенная изгибная жесткость сечения, D_n - приведенная изгибная жесткость многослойной балки

В балке предполагается непрерывность напряжений на границе каждого слоя. При изгибе балки касательные напряжения на внешних границах и нормальные напряжения на верхней границе балки равны нулю из-за отсутствия нагрузки. Из условия того, что балка лежит на упругом основании, нормальные напряжения на нижней границе равны напряжениям, возникающим в упругом основании. Откуда граничные условия:

$$\begin{aligned} y = y_0 : \tau_{xy}^{(1)} &= 0, \sigma_y^{(1)} = 0 \\ y = y_k : \tau_{xy}^{(k)} &= \tau_{xy}^{(k+1)}, \sigma_y^{(k)} = \sigma_y^{(k+1)}, k = 1 \dots n-1 \\ y = y_n : \tau_{xy}^{(n)} &= 0, \sigma_y^{(n)} = -kw \end{aligned} \quad (7)$$

где y_0 - координата верхнего слоя, y_k - координата k слоя, y_n - координата нижнего слоя.

При подстановке граничных условий напряжений в каждом слое из системы (7) в дифференциальные

$$\begin{aligned} \tau_{xy}^{(k)} &= (-E_k \frac{y^2}{2} + E_1 \frac{y_0^2}{2} + \sum_{j=2}^k (E_j - E_{j-1}) \frac{y_{j-1}^2}{2}) (-\frac{d^3 w}{dx^3}) \\ \sigma_y^{(k)} &= (E_k \frac{y^3}{6} - E_1 \frac{y y_0^2}{2} - \sum_{j=2}^k (E_j - E_{j-1}) \frac{y y_{j-1}^2}{2} + E_1 \frac{y_0^3}{3} - \sum_{j=2}^k (E_{j-1} - E_j) (\frac{y_{j-1}^3}{3})) (-\frac{d^4 w}{dx^4}) \end{aligned} \quad (8)$$

Подставим во второе уравнение из (6) третье условие системы (7), откуда получается выражение:

$$\begin{aligned} D_n \frac{d^4 w}{dx^4} + bkw &= 0, \\ D_n &= \sum_{j=1}^n E_j I_j = E_n \frac{b y_n^3}{3} - E_1 \frac{b y_0^3}{3} + \sum_{j=2}^n (E_{j-1} - E_j) (\frac{b y_{j-1}^3}{3}) \end{aligned} \quad (9)$$

где I_i - момент инерции слоя i .

Граничные условия для задачи с меняющимися значениями параметров по толщине, будут аналогичны задаче с изотропной балкой. Уравнение (2) и (9) отличаются только параметром жесткости, зависящим от количества слоев. Поэтому общее решение для уравнения (9) будет соответствовать решению (5), но с различным параметром α .

При решении задачи возникает вопрос о распределении модуля Юнга по толщине пластины. При этом для различных льдов оно будет разное. Распределение зависит от многих факторов, таких как толщина льда, его температура, соленость, плотность, относительный объем рассола и др. При этом для льдов, толщиной менее одного метра, распределение предполагается линейное [9]. Для более толстых льдов предположим, что распределение описывает некоторая степенная функция:

$$E_i = a + b y_i^m \quad (10)$$

Предполагается, что различие модуля Юнга в верхнем и нижнем слое равно параметру d , зависящего от различных факторов.

$$\frac{E_1}{E_n} = d \quad (11)$$

Значение для некоторых параметров d представлены в таблице 1. Эти значения получены на основе аналитических выражений, представленных в работе [10]. Отношение модулей юнга зависит от солёности льда, которая вычисляется по разны формулам для толщины льда до 0.34 м и более 0.34м. Численно получено, что значение параметра m в степенной функции будет меняться от 1 для не широких льдов до 0.5 для льдов, шириной более трех метров.

уравнения равновесия системы (6), касательные и нормальные напряжения для каждого слоя принимают вид:

Таблица 1

Значение d при различной температуре и толщине льда

h \ T	-1	-5	-10	-20
0.1	1.33	1.35	1.37	1.39
0.3	2.8	2.98	3.12	3.33
0.5	1.25	1.27	1.29	1.31
1	1.61	1.66	1.71	1.78

При описании эксперимента, представление льда как слоистую балку, не должно вызывать изменения результатов наблюдения. Из уравнений (2) и (9) видно, что единственный параметр, подвергающийся изменению это множитель при четвертой производной. При его изменении будет меняться точка разлома и другие наблюдаемые параметры.

Поэтому в дальнейшем предполагается, что оба множителя равны, то есть:

$$E_0 I_0 = \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (12)$$

3. Неоднородность льда по длине клавиши

В модельных льдах регистрируют значения модуля Юнга, изменяющиеся не только по толщине льда, но по его поверхности. Считается, что такие различия механических характеристик вызваны различными внешними факторами [10] при образовании льдов. Одной из гипотез, объясняющих различие регистрируемых механических характеристик в различных частях приготавливаемого в одинаковых условиях поля моделированного льда, является формирование стоячих волн, которые вызывают случайные осцилляции прочности [11].

Предположим, что условия формирования ледяного покрова менялись по продольной координате. Рассмотрим ледяную клавишу с изменяющимися значениями модуля Юнга по ее длине, при этом пусть параметр E меняется по линейному закону. Для упрощения задачи рассмотрим всего один слой по толщине льда. Будем рассматривать лед, как балку на упругом основании с уравнением прогиба:

$$(1 + cx)EI \frac{d^4 w}{dx^4} + bkw = 0, I = \frac{bh^3}{12} \quad (13)$$

где c - некоторая константа неоднородности, определяемая из эксперимента.

В силу нетривиальности аналитического решения для данной постановки, далее будем рассматривать

численное решение уравнения с граничными условиями, приведенными в первой части.

Также возможна ситуация, когда не удается определить закономерность в пространственном изменении значений модуля Юнга. Это может происходить, в том числе, из-за недостаточного числа проводимых измерений и из-за невозможности повторного определения модуля Юнга в одной точке поверхности. Разброс результатов измерения модуля Юнга наблюдался при определении физико-механических свойств приготавливаемого ледового поля в ледовом бассейне КГНЦ.

При невозможности обоснованного задания детерминированной закономерности для модуля Юнга, целесообразно представить значения этого параметра в качестве реализаций случайной величины. Таким образом, в уравнении (2) вместо постоянного коэффициента E_0 будет фигурировать случайная величина E . Свойства получающихся решений будут зависеть от вида распределения этой случайной величины, и могут быть оценены при помощи имитационного моделирования.

4. Численное решение задачи

Для оценки влияния изменения значения модуля Юнга по длине и толщине клавиши, рассмотрим решение задачи с параметрами, приведенными в таблице 2. Эти параметры соответствуют льду в Карском море [10].

Таблица 2

Параметры модели

Параметр	Величина
Толщина балки	1 м
Длина балки	100 м
Ширина балки	3 м
Средний модуль Юнга	4 ГПа
Максимальные изгибные напряжения	0.7 МПа
Угол наклона сооружения	45°
Коэффициент трения	0.02
Температура верхнего слоя льда	-10 °С
Скорость дрейфа	0.2 м/с
Угол наклона сооружения	45°

Исходя из таблицы 1, значение параметра $d=1.71$. Будем предполагать, что параметр неоднородности s меняется от 0.01 до 0.3. Изменение модуля Юнга влечет за собой изменение максимальных изгибных напряжений, поэтому в различных постановках разрушение будет происходить при различных напряжениях.

Будем предполагать, что максимальные напряжения и модуль упругости связаны линейно [12]

и их константа пропорциональности находится из отношения среднего значения модуля Юнга и максимальных изгибных напряжений, представленных в таблице 2.

В таблице 3 представлено сравнение результатов для трех разных постановок моделей. Так как значения жесткости в изотропном случае и в случае неоднородности по толщине одинаковы, координаты точки разлома не будут меняться. Из-за изменения модуля Юнга и, соответственно, максимальных напряжений в каждом подслое, время разлома и максимальная сила будут различны. При рассмотрении модели слоистой балки, в ней возникнут слои, в которых разрушение будет происходить раньше по времени.

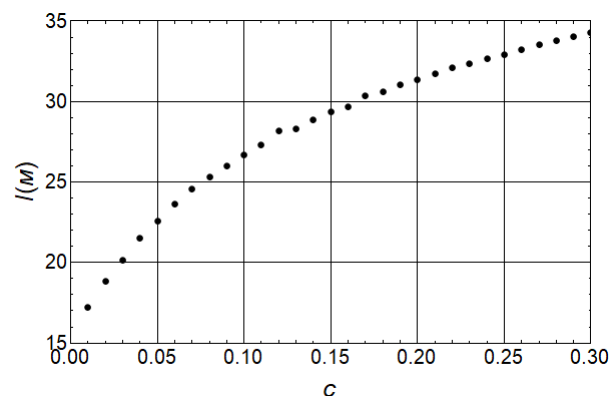


Рис.2. Зависимость точки разлома льда l от параметра c

При увеличении константы неоднородности s , также увеличивается значение координаты точки разлома (рис. 2). Из уравнения (5) можно получить, что точка разлома будет пропорциональна корню четвертой степени из E , откуда получается вид кривой на графике.

Рассмотрим ситуацию, когда значение модуля Юнга льда имеет не детерминированный, а случайный характер. Предположим, что это значение имеет нормальное распределение с математическим ожиданием 4 ГПа и некоторым средним квадратическим отклонением s . Разыгрывая случайную величину с данными характеристиками, и подставляя полученные значения в решение (5), получим следующие значения абсолютной ошибки отклонения точки разлома от изотропной модели (рис. 3). Для получения этих результатов было проделано 10000 вычислений w для каждого из предполагаемых значений s .

Таблица 3

Сравнение решений

	Точка разлома [м]	Максимальная разрушающая сила N [кН]	Время разлома [м]	Прогиб в точке контакта [м]
Изотропный лед	15.5417	28.879	1.01	0.203
Неоднородность по толщине	15.5417	27.359	0.965	0.193
Неоднородность по длине ($s = 0.01$)	17.4185	29.073	1.06	0.212

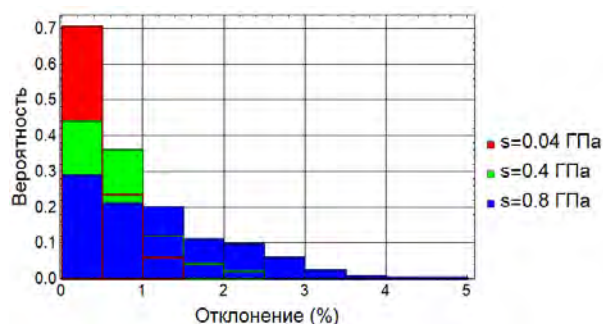


Рис.3. Гистограмма вероятности возникновения ошибки от отклонения от точки разлома в изотропной модели

При увеличении среднего квадратического отклонения модуля Юнга, увеличивается разброс значений координаты точки разлома вокруг ее математического ожидания.

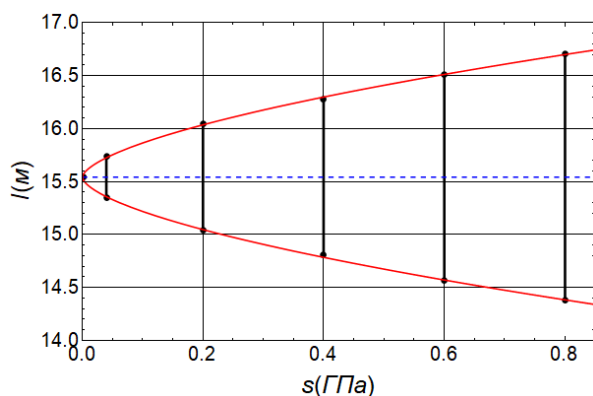


Рис. 4 Зависимость среднего квадратического отклонения модуля Юнга от интервалов точки разлома (синяя прямая – математическое ожидание, черные прямые – разброс значений точек разлома, красные кривые – интерполяция точек)

На рисунке 4 приведены границы интервалов, в которые значения отклонений координаты точки разлома для рассмотренных условий попадают с

вероятностью 0.95. Эти значения получены при помощи статистического моделирования в пакете Wolfram Mathematica.

Из проведенного статистического эксперимента видно, что увеличение разброса значений модуля Юнга приводит к заметному расширению 95% интервала для отклонения координаты точки разлома.

Из рисунка 4 эмпирическую функцию, интерполирующую верхние и нижние границы интервала, можно записать в виде:

$$l_{\max} = 1.33s^{0.61} + l_0, l_{\min} = -1.33s^{0.61} + l_0 \quad (14)$$

где l_0 - точка разлома в изотропной модели, l_{\max} - верхняя граница интервала, l_{\min} - нижняя граница интервала.

Выводы

Учет распределения внутренних параметров в ледяной балке является важным при составлении модели. В статье рассматривались два вида неоднородностей: по длине и толщине клавиши.

Для учета распределения температуры по толщине льда, рассматривалось разбиения льда на слои, в каждом из которых наблюдалось изменение внутренних параметров. При сравнении полученных решений с изотропной моделью, результаты отличаются не более чем на 5%.

При рассмотрении неоднородностей по длине клавиши учитывалось, что модуль Юнга не всегда представляет из себя заданную функцию, но может проявлять случайный характер, при котором его значение может изменяться в пределах некоторого диапазона. Такой вид неоднородности может приводить к существенному изменению положения точки разлома ледяной балки при взаимодействии ее с наклонным сооружением. При этом существенное влияние на результат оказывает величина разброса модуля Юнга, рассматриваемого в качестве случайной характеристики полубесконечной ледяной балки в исходной задаче о ее прогибе.

Благодарности

Работа выполнена как часть проекта 0784—2020—0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Автор благодарит Звягина Петра Николаевича и Сазонова Кирилла Евгеньевича за консультацию при написании работы.

Литература

1. Timco GW., Frederking RMW. Comparative strengths of fresh water ice // Cold Regions Science and Technology. 1982. Vol. 6. pp. 21-27
2. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда. // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 4 - 41
3. Барменкова Е.В., Андреев В.И.. Изгиб двухслойной балки на упругом основании с учетом массовых сил и деформаций сдвига // Вестник МГСУ. 2010. Вып. 3. С. 87-93
4. Шадур Л.А., Челноков И.И. Вагоны: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.:Транспорт. 1980. 439 с.
5. Морозов Н.Ф., Товстик П.Е.. Изгиб двухслойной балки с нежестким контактом между слоями // Прикладная математика и механика. 2011. Вып. 75(1), С. 112-121
6. Frederking RMW, Timco GW. Quantitative Analysis of Ice Sheet Failure Against an Inclined Plane // Journal of Energy Resources Technology. 1985. Vol. 107. pp. 381-387
7. Dempsey J.P, Palmer A.C. Ice-slope interaction: transitions in failure mode. 1999 ASME Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. 1999 July 11-16, St John's, Newfoundland, Canada
8. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.. Морской лед. Л: Гидрометеиздат, 1974. 318 С.
9. Chenglin D., Sheng D., Zhifeng W. Estimates of Sea Ice Mechanical Properties in the Kara Sea // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177, pp. 5101-5116

10. Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. СПб:Гидрометеиздат, 2001, 78 С.
11. Епифанов В.П., Сазонов К.Е. Влияние стоячих волн на локальную прочность моделированного ледяного поля. Доклады Академии Наук. 2019. Вып. 489(6), с. 564-569.
12. Shun-ying Ji, Jie Su, An-liang Wang, Qian-jin Yue. Experimental Studies on Elastic Modulus and Flexural Strength of Sea Ice in the Bohai Sea // Journal of Cold Regions Engineering. Vol.25(4). pp. 182-195

References

1. Timco GW., Frederking RMW. Comparative strengths of fresh water ice // Cold Regions Science and Technology. 1982. Vol. 6. pp. 21-27
2. Petrov I.G. Vybora naibolee veroyatnykh znachenij mekhanicheskikh harakteristik l'da [Selection of the most probable values of the mechanical characteristics of ice]. // Trudy ANII. 1976. Vol. 331. pp. 4 – 41
3. Barmenkova E.V., Andreev V.I.. Izhig dvuslojnoj balki na uprugom osnovanii s uchedom massovyh sil i deformatsij sdviga [Bending of a two-layer beam on an elastic foundation, taking into account mass forces and shear deformations] // Vestnik MGSU. 2010. Vol. 3. pp. 87-93
4. SHadur L.A., CHelnokov I.I. Vagony: uchebnyk dlya vuzov zh.-d. transp [Cars: a textbook for higher educational institutions of the railway. transport]. M.:Transport. 1980. 439 P.
5. Morozov N.F., Tovstik P.E.. Izhig dvuslojnoj balki s nezhestkim kontaktom mezhdru slojami [Bending of a two-layer beam with non-rigid contact between layers] // Prikladnaya matematika i mekhanika. 2011. Vol. 75(1), pp. 112-121
6. Frederking RMW, Timco GW. Quantitative Analysis of Ice Sheet Failure Against an Inclined Plane // Journal of Energy Resources Technology. 1985. Vol. 107. pp. 381-387
7. Dempsey J.P, Palmer A.C. Ice-slope interaction: transitions in failure mode. 1999 ASME Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. 1999 July 11-16, St John's, Newfoundland, Canada
8. Doronin YU.P., Hejsin D.E.. Morskoj led [Sea ice]. L: Gidrometeoizdat, 1974. 318 P.
9. Chenglin D., Sheng D., Zhifeng W. Estimates of Sea Ice Mechanical Properties in the Kara Sea // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177, pp. 5101-5116
10. Stepanyuk I.A. Tekhnologii ispytanij i modelirovaniya morskogo l'da [Sea ice testing and modeling technologies]. SPb:Gidrometeoizdat, 2001, 78 P.
11. Epifanov V.P., Sazonov K.E. Vliyanie stoyachih voln na lokal'nuyu prochnost' modelirovannogo ledyanogo polya [Influence of standing waves on the local strength of the simulated ice field]. Doklady Akademii Nauk. 2019. Vol. 489(6), pp. 564-569.
12. Shun-ying Ji, Jie Su, An-liang Wang, Qian-jin Yue. Experimental Studies on Elastic Modulus and Flexural Strength of Sea Ice in the Bohai Sea // Journal of Cold Regions Engineering. Vol.25(4). pp. 182-195

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александра Андреевна Симакина, аспирант, инженер, инженер лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: Aleksandra.simakina@gmail.com

Aleksandra A. Simakina, graduate student, engineer, engineer of the laboratory of ice engineering research fundamentals, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya st., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: Aleksandra.simakina@gmail.com

УДК 629.12.011

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.003

Расчет остаточного сопротивления судна по теоретическому чертежу

А.Ш. Готман¹¹Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье впервые дан метод расчета остаточного сопротивления водоизмещающих судов не по параметрам, а по ординатам теоретического чертежа.

Необходимость определения сопротивления воды движению судна возникает на первой же стадии при проектировании корпуса. Достоверную кривую сопротивления получают только путём дорогостоящих буксировочных испытаний, поэтому возможность расчета такой кривой является одной из самых актуальных задач проектирования, решению которой посвящены сотни работ. В статье вкратце приводится вековая история поисков метода расчета сопротивления воды движению судна.

В статье описаны полученные автором три фундаментальные решения, позволившие, в конце концов, решить эту задачу. Первое решение - это разделение интеграла Мичелла на главную и интерференционную части. Второе - это объяснение гидродинамики создаваемого судном потока и доказательство необходимости учета сдвига подпорными волнами носовой Кельвиновской волновой системы. Третье решение, которому посвящена данная статья, заключается в теоретическом и экспериментальном доказательстве того, что на малых и средних числах Фруда расчет главной части интеграла Мичелла даёт кривую, которая проходит близко к экспериментальной кривой остаточного сопротивления, что позволяет использовать её на практике. В конце статьи приводятся результаты сравнения расчетов с экспериментом для 28-ми моделей.

Показано также, что практически нельзя считать интеграл Мичелла по ординатам теоретического чертежа, и приводится метод аппроксимации ватерлиний и шпангоутов с помощью одной кривой, - разработанной для этой цели - «корабельной верзиерой»

Ключевые слова: остаточное сопротивление, водоизмещающие суда, главная часть интеграла Мичелла, корабельная верзиера.

Calculation of the residual resistance of the vessel according to the theoretical drawing

Ada Sh. Gotman¹¹Siberian State University of Water Transport

Abstract. This article presents the first description of the obtained method for calculating the residual resistance of displacement vessels not by parameters, but by ordinates of a theoretical drawing.

The need to determine the resistance of water to the movement of the vessel arises at the very first stage of the hull designing. Usually a reliable resistance curve is obtained only through expensive towing tests, therefore the ability to calculate such a curve is one of the most urgent design problems, the solution of which is devoted to hundreds of works.

This article briefly describes the centuries-old history of searching for a method for calculating the resistance of water to the movement of a vessel. The article describes three fundamental solutions obtained by the author, which have allowed to solve this problem. The first solution is the partition of the Michell integral into the main and interference parts. The second is the explanation of the hydrodynamics of the flow created by the vessel, and the proof of the necessity to take into account the shift by the retaining waves of the bow Kelvin wave system. The third solution, to which this article is devoted, consists in the theoretical and experimental proof that, at low and medium Froude numbers, the calculation of the main part of the Michell integral provides the curve which passes so close to the experimental residual resistance curve, that it is possible to use it in practice. At the end of the article, the results of comparing calculations with experiment for 28 models are presented.

It is also shown that it is impossible to calculate the Michell integral according to the ordinates of the theoretical drawing, and the method of approximating waterlines and frames with the help of a single curve is presented - a "ship's versier" developed for this purpose.

Key words: residual resistance, displacement ships, the main part of the Michell integral, ship's versier.

Введение

Джон Мичелл решил задачу определения волнового сопротивления водоизмещающего судна при трёх допущениях: 1) судно считается узким, 2) вызванные судном волны считаются малыми, т.е. отношение их высоты к длине мало, 3) жидкость считается идеальной, т.е. лишенной вязкости.

Изучать свойства этого интеграла начали только через тридцать лет после опубликования Дж. Мичеллом статьи в 1898 году [1]. Это делали В.Виглей в Англии и Г.Вейнблум в Германии. Дж.

Мичелл в своей статье не привел ни одного примера расчета, несмотря на то, что, по свидетельству его брата, он выполнял расчеты своего интеграла. Следует учесть, что в его распоряжении были только концелярские счеты, которые не давали возможностей современных компьютеров. У него не было даже логарифмической линейки.

Из интеграла Мичелла (1) видно, что в подынтегральную функцию входят первые производные по x уравнения поверхности корпуса судна $y = f(x, z)$

$$R = \frac{4\rho g^2 b^2}{\pi \nu^2} \operatorname{Re} \int_0^{\pi/2} \sec^3 \theta d\theta \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^T \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^T f'_x(x, z) f'_\xi(\xi, \zeta) \cdot e^{-p(\zeta+z)} \cdot e^{ik(x-\xi)} dx dz d\xi d\zeta \quad (1)$$

на форштевне и ахтерштевне, т. е. в углах слома ватерлиний.

В процессе изучения интеграла Мичелла выяснилось, что интеграл принимает в расчет все волны, которые образуются при движении судна или модели в местах сломов на поверхности тела. Эти волны легко наблюдать в опытовом бассейне при испытании моделей со сломами на поверхности.

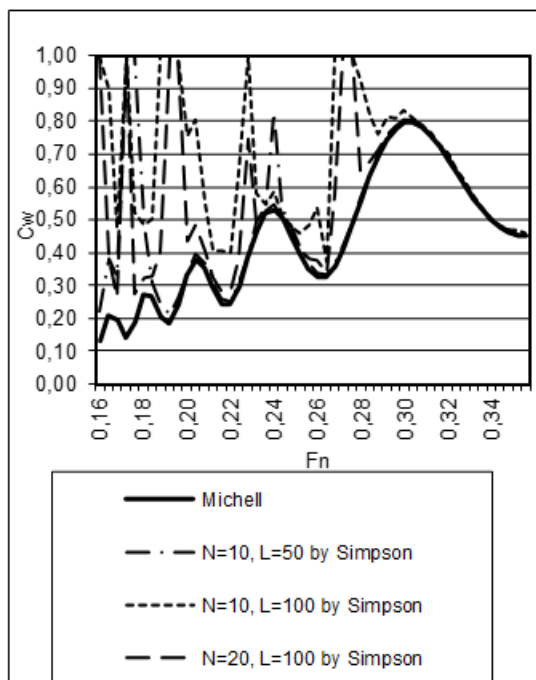


Рис. 1. Сравнение результатов численного интегрирования с разным числом шпангоутов и ватерлиний (N – число ватерлиний, L – число шпангоутов)

Кроме того, вычисление интеграла с разным числом ватерлиний и шпангоутов показало, что при малом количестве шпангоутов, т. е. с интегрированием по ломаным ватерлиниям, расчетные точки выскакивают до бесконечно больших значений. Это показано на рис. 1. Оказалось, что для исключения влияния сломов сечений, нужно в расчете брать не меньше 200 ватерлиний и 1000 шпангоутов. Тогда касательные в местах сломов образуют угол, близкий к нулю, и сечения получаются почти «гладкими». Такие расчеты вряд ли мог в своё время выполнить Мичелл.

С этим же явлением должны были столкнуться В.Виглей и Г.Вейнблум. По всей видимости, именно по этой причине В.Виглей и Г.Вейнблум придумали аналитические обводы, близкие по форме к реальным судам. Эти аналитически заданные обводы позволили им выпонять точное интегрирование и получить точные кривые Мичелла. Эти кривые получились с горбами и впадинами. Однако, было важно, что кривая Мичелла всегда проходит близко к кривой остаточного сопротивления

для каждой из многочисленных испытанных и обчисланных ими моделей. Это хорошо видно в таблицах ПРИЛОЖЕНИЯ этой статьи (первый столбец).

Это был **первый** очень важный результат для оценки интеграла Мичелла. В 1952 году Г.Вейнлюм, Дж. Кендрик и М.Тодд в бассейне Давида Тейлора провели испытания модели, отвечающей первому допущению Мичелла [2]. Модель имела отношение длины к ширине 36,7. Результаты испытания приведены на рис. 2. Совпадение горбов и впадин подтвердило корректность интеграла Мичелла. Точно такой же эксперимент с моделью меньшего удлинения провел С.Шарма в 1969 году [3]. Реальные суда и модели имеют удлинение порядка 10-ти, поэтому носовая и кормовая системы волн интерферируют не так, как это происходит у длинных моделей.

На основании этих исследований стало ясно, что причина горбов и впадин на расчетной кривой Мичелла связана с третьим допущением: в расчете жидкость считается идеальной, в то время, как все эксперименты выполняются в реальной, т.е. вязкой, жидкости. В дальнейших работах В.Виглей искал поправку к интегралу Мичелла, учитывающую эту вязкость. Однако введение такой поправки в интеграл Мичелла не так просто. Именно из-за этого обстоятельства автором была выведена новая форма, которая позволила обнаружить важные неизвестные ранее свойства интеграла Мичелла [4].

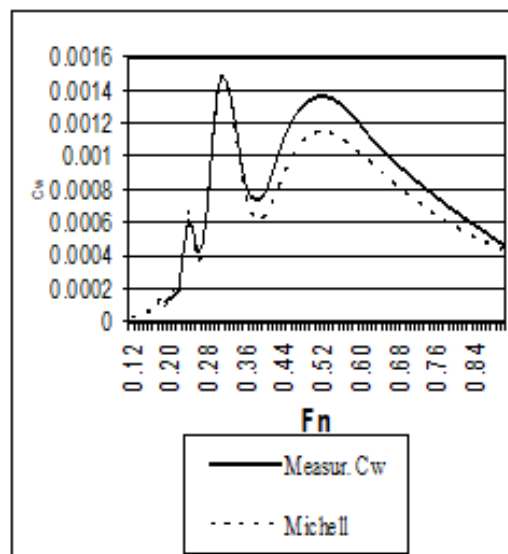


Рис. 2. Эксперимент и расчет Г.Вейнблума, Дж. Кейндрика и М. Тодда 1952 г

Все попытки В.Виглея и Г.Вейнблума получить метод расчета сопротивления водоизмещающего судна не давали практически приемлемого результата, поэтому в 1963 году в Анн Арборе штата Мичиган в США был организован семинар, в работе которого приняли участие ученые всех судостроительных держав мира, даже ученые Японии. Таким образом, вся теоретическая, прикладная и экспериментальная наука мира была вовлечена в решение этой задачи.

На семинаре был разработан план теоретических и экспериментальных работ, необходимых для решения этой задачи. Если до этого семинара в

научной литературе появлялось две – три работы в год по этой проблеме, то, начиная с 1963-го года, пошёл поток сотен работ. Следует отметить, что это единственный в истории науки случай, когда для решения одной практической задачи объединяются ученые всего мира [4].

При организации этого семинара Г.Вейнблюм исходил из того, что математическая сложность данной задачи не позволяет простым инженерам принимать участие в её решении. Это привело к тому, что её решали математики - прикладники. Все поиски сводились к тому, чтобы учесть влияние членов высшего порядка в уравнении и в граничных условиях. Считалось, что все недостатки интеграла Мичелла связаны с линеаризацией задачи.

После 13-ти лет совместной интенсивной работы 1976 году был организован в Токио семинар для подведения итогов этой огромной работы. На этом семинаре было признано, что возникли новые проблемы, но решение так и не найдено. После этого семинара финансирование судостроителями и судовладельцами резко сократилось, и многие исследователи отошли от решения этой задачи.

Особенности новой формы интеграла Мичелла

В 2002 году автором была получена новая форма интеграла Мичелла, которая отличается тем, что часть, отвечающая за распределение давления по корпусу судна, отделена от части, отвечающей за волновые системы, создаваемые движущимся судном, и их интерференцию. Подробный вывод новой формы интеграла Мичелла приводится в работе [5], а здесь рассматривается только результат. Пусть $y = f_1(z) \cdot f_2(x)$ - уравнение

$$\begin{aligned}
 G_{b1} &= g'(1) - g'''(1)k^{-2} + g^V(1)k^{-4} - \dots (-1)^{r+1} g^{(2r-1)}(1)k^{-(2r-2)}, \\
 G_{bo} &= g(1) - g''(1)k^{-2} + g^{IV}(1)k^{-4} \dots \begin{cases} (-1)^r g^{(2r-2)}(1)k^{-2r}, & \text{аÑèè } m = 2r + 1, \\ (-1)^{r-1} g^{(2r)}(1)k^{-(2r-2)}, & \text{аÑèè } m = 2r, \end{cases} \\
 G_{s1} &= g'(-1) - g'''(-1)k^{-2} + g^V(-1)k^{-4} - \dots (-1)^{r+1} g^{(2r-1)}(-1)k^{-(2r-2)}, \\
 G_{so} &= g(-1) - g''(-1)k^{-2} + g^{IV}(-1)k^{-4} \dots \begin{cases} (-1)^r g^{(2r-2)}(-1)k^{-2r}, & \text{аÑèè } m = 2r + 1, \\ (-1)^{r-1} g^{(2r)}(-1)k^{-(2r-2)}, & \text{аÑèè } m = 2r, \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3}$$

состоят из производных ватерлиний на форштевне и ахтерштевне. Для удобства введено обозначение производной по x в виде $g(x) = f'_x(x, z)$. Все производные, входящие в формулу (3), берутся в интеграле Мичелла в точках $x = 1$ и $x = -1$, т.е., $g(1) = f_x(1, 0)$, $g(-1) = f_x(-1, 0)$ и т. д.

Замечание. Эта форма интеграла Мичелла позволяет вводить поправки, учитывающие гидродинамику вызванного движением судна потока, потому что в ней понятно значение каждого члена.

Второй очень важный практический результат заключался в следующем. Новая форма интеграла позволила получить оптимальные с точки зрения сопротивления формы корпуса. В конце статьи 2002-го года [5] приведены оптимальные обводы. Среди них есть обводы с носовым бульбом и миделевым булем. Обводы с миделевым булём имеют форму средневековых судов, которые отработаны веками и

поверхности корпуса судна. Интеграл Мичелла получается в виде:

$$R_w = \frac{4\rho g^2}{\pi v^2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \cdot T^2 [I_1^2 + I_2^2], \tag{2}$$

где

$$I_1 = \int_0^{\pi/2} J_4^2(p) \cdot F_1(k) \frac{d\theta}{\cos^3 \theta}$$

- интеграл, учитывающий давления на корпусе судна.

$$I_2 = 2 \int_0^{\pi/2} J_4^2(p) [F_2(k) \cos 2k + F_3(k) \sin 2k] \frac{d\theta}{\cos^3 \theta}$$

- нтеграл, учитывающий взаимодействие носовой и кормовой волновых систем. Интеграл

$$J_4(p) = \int_0^1 f_1(z) \cdot e^{-pz} \cdot dz,$$

учитывает влияние формы шпангоутов от киля до действующей ватерлинии. Здесь

$$\begin{aligned}
 F_1(1) &= k^{-2} [G_{bo}^2 + k^{-2} G_{b1}^2 + G_{so}^2 + k^{-2} G_{s1}^2]; \\
 F_2(1) &= k^{-2} [G_{bo} G_{so} + k^{-2} G_{b1} G_{s1}]; \\
 F_3(1) &= k^{-3} [G_{bo} G_{s1} - k^{-2} G_{b1} G_{so}];
 \end{aligned}$$

имеют наименьшее сопротивление и лучшие мореходные качества по сравнению с любыми другими формами.

В статье показано, что главная часть интеграла Мичелла даёт возможность сравнивать разные обводы корпуса с точки зрения их сопротивления, и даже строить приближённую кривую остаточного сопротивления.

Третий важный результат заключается в том, что, наконец, было обращено внимание на то, что вершина носовой Кельвиновской системы с увеличением скорости движения судна или модели все больше и больше сдвигается по направлению к миделю. На этот сдвиг обращали внимание японские исследователи, но они не принимали его в расчет. Подробное описание подхода к учету этого сдвига описано в работе автора [6].

Парадоксы в задаче определения сопротивления судов

Решить задачу определения сопротивления движению водоизмещающего судна невозможно, не разобравшись с парадоксами, которые возникают при решении этой задачи.

Первый парадокс заключается в том, что все разработчики расчетов сопротивления считают, что возможно рассматривать обращенное движение, т.е. считать судно неподвижным, а поток натекающим на него с постоянной скоростью. Они исходят из того, что можно пренебречь парадоксом Дю Буа. Суть парадокса Дю Буа в том, что сопротивление вертикальной палки при её движении больше, чем при натекании потока на неподвижную палку. Дело в том, что при движении палка должна вывести неподвижную жидкость из состояния покоя, а при фиксированном её положении происходит только отклонение линий тока движущейся жидкости. То же происходит и при расчете сопротивления судна. Когда рассматривают обращенное движение, то **не учитывают** действие **подпорных волн**, образующихся в реальной жидкости.

Второй парадокс. Расчетная кривая волнового сопротивления для большинства моделей судов проходит выше кривой экспериментального остаточного сопротивления. Волновое сопротивление является частью остаточного сопротивления, поэтому то, что она проходит выше кривой остаточного сопротивления, противоречит здравому смыслу и требует специального рассмотрения.

Третий парадокс связан с экспериментом Г.Вейнблума, Дж.Кендрика и М.Тодда с длинной моделью. Для такого совпадения расчетной кривой с экспериментальной, как в их эксперименте (рис. 2),



Рис. 3. Эсминец

требуется выполнение не только первого, как предполагали авторы, но и двух других допущений Мичелла, а это значит, что вода в этом эксперименте ведёт себя как идеальная. Почему?

Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [6].

Учёт сдвига кельвиновской системы волн в расчёте сопротивления

Следует отметить, что сопротивление трения невидимого пограничного слоя на корпусе судна точно описывается экстраполяторами, а хорошо видимые подпорные волны, сдвигающие Кельвиновскую носовую систему волн, в расчетах вообще никем не учитываются.

Если рассматривать не обращенное, а реальное движение судна, то следует учитывать образование подпорных волн и их действие на носовую волновую систему. Это действие состоит в сдвиге вершины носовой волновой системы по корпусу судна в кормовом направлении, что хорошо видно, например, на фотографии рис. 3. Сдвиг объясняется тем, что поля разной природы не могут существовать в одном пространстве по известному в теории поля закону

$$\text{rot grad}\varphi = 0$$

Исследование этого сдвига объясняет значение **первого парадокса** следующим образом.

В новую форму интеграла Мичелла. входят производные ватерлиний на форштевне и ахтерштевне (3). Первая производная равна тангенсу угла входа главной ватерлинии. Так как вершина носовой системы волн сдвигается в корму, эти производные нужно брать не на форштевне, а в тех точках, в которые сдвинулась эта вершина. Причём (рис. 4а) при выпуклых ватерлиниях сдвиг приводит к необходимости уменьшения расчётного угла входа

($\beta < \alpha$), и тогда, если принять угол β вместо угла на форштевне α , расчётная кривая Мичелла опустится до положения кривой остаточного сопротивления. В случае вогнутой ватерлинии при сдвиге вершины волн угол наоборот увеличится ($\beta > \alpha$). Это хорошо видно на рис. 4б. При очень малых углах входа ватерлиния возле форштевня вогнутая, и расчетная кривая Мичелла обычно проходит ниже кривой остаточного сопротивления.

Зависимость сложнее при наличии перегиба на пути смещения вершины системы носовых волн. Если действующая ватерлиния имеет перегиб, то, несмотря на малый угол входа главной ватерлинии, расчётная кривая Мичелла может проходить выше экспериментальной кривой остаточного сопротивления.

Объяснение второго парадокса. На основании приведенного выше описания действия подпорных волн легко объяснить второй парадокс. Расчетная кривая Мичелла может проходить выше экспериментальной кривой остаточного сопротивления в том случае, когда главная ватерлиния выпуклая, тогда получается, что вместо действительного угла касательной к действующей ватерлинии в месте вершины Кельвиновской носовой системы в расчете берётся угол на форштевне, который при выпуклых ватерлиниях значительно больше.

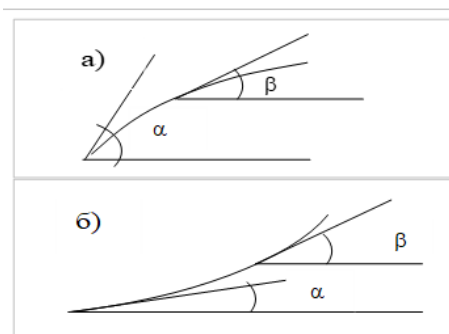


Рис. 4. К сдвигу вершины носовой системы волн

Сдвиг производится подпорными волнами, которые имеют турбулентную природу, т.е. напрямую связаны с вязкостью жидкости. Кроме этого, благодаря вязкости жидкости, под поверхностью Кельвиновских волновых систем образуется турбулентный пограничный подслей. Таким образом, можно влияние вязкости на остаточное сопротивление судна учитывать с помощью двух поправок: поправки сдвига k_{sd} и поправки на турбулентный пограничный подслей $k_{\delta\delta\delta\delta}$.

$$G_{bo} = g(1) \cdot k_{sd} - g''(1)k^{-2} + g^{IV}(1)k^{-4} \dots \begin{cases} (-1)^r g^{(2r-2)}(1)k^{-2r}, & \text{ãñèè } m = 2r + 1, \\ (-1)^{r-1} g^{(2r)}(1)k^{-(2r-2)}, & \text{ãñèè } m = 2r, \end{cases} \quad (6)$$

Если положить обе поправки равными единице, то получится приведенная выше новая форма интеграла Мичелла.

Объяснение третьего парадокса. Теперь можно объяснить третий парадокс, связанный с длинными моделями. Если модель имеет большое удлинение, то в этом случае угол входа носовых ватерлиний очень мал (у модели Г.Вейнблума и др. он примерно 2°). В этом случае подпорные волны не образуются, потому что линии тока очень близки к прямым. Значит, нет сдвига носовой системы волн и нет турбулизации потока, поэтому жидкость ведёт себя как идеальная. Таким образом, в этом эксперименте выполняются все три допущения Мичелла.

Заключение.

Поправки на сдвиг и турбулентность в данных расчетах подбирались до совпадения расчетной кривой с экспериментальной (см. второй столбец ПРИЛОЖЕНИЯ).. Возможность такого подбора подтвердила правильность понимания гидродинамики создаваемого судном потока, но не привела к возможности определения этих двух поправок теоретическим путём. Эти поправки могут быть получены только эмпирически. Причем, эксперименты должны проводиться для каждого типа судов отдельно, потому что эти поправки зависят от **всех параметров** формы корпуса, что невозможно учесть теоретически

Корабельная верзиера

В процессе практического решения задачи о расчете сопротивления движению водоизмещающего судна возникла важная проблема аналитического описания обводов.

Получить уравнение поверхности корпуса в общем виде

$$y = f(x, z)$$

невозможно. Для задания поверхности корпуса обычно используются сплайны. Сплайны сглаживают сломы на ватерлиниях и шангоутах, но использовать их в расчетах громоздко и сложно.

Расчётная форма интеграла Мичелла с двумя поправками имеет другой вид: формула (2) записывается в виде (4)

$$R_w = \frac{4\rho g^2}{\pi v^2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \cdot T^2 [I_1^2 + (k_{\delta\delta\delta\delta} \cdot I_2)^2] \quad (4)$$

Поправка сдвига принимается в виде

$$k_{sd} = k_1 \pm k_2 \cdot (Fr - Fr_o) \quad (5)$$

и вводится множителем к первой производной в формулу (3), т. е.

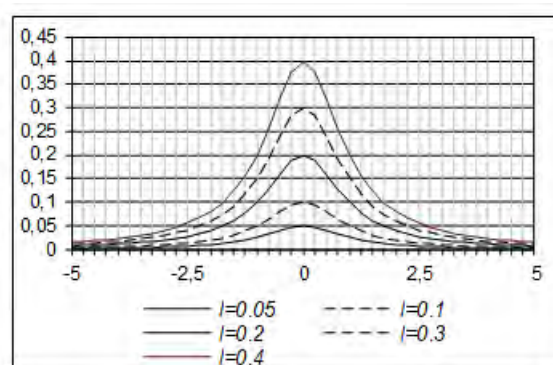


Рис. 5. Множество кривых, названное «корабельной верзиерой»

В своё время автором была разработана кривая для аппроксимации сечений корпуса водоизмещающего судна. В основу взята известная кривая Марии Аньези – верзиера [5] с уравнением

$$y = \frac{8a^3}{4a^2 + x^2}.$$

Эта кривая имеет вершину и два перегиба. Путём её преобразования разработана кривая, дающая возможность аппроксимировать достаточно сложные сечения корпуса судна [7].

В уравнение верзиеры введены два параметра k и l и получено уравнение множества кривых в виде

$$y = \frac{k l}{k + x^2}. \quad (7)$$

Варьируя двумя параметрами k и l , легко получить аппроксимацию любого сечения теоретического чертежа. Уравнение (7) представляет собой множество кривых и названо нами «корабельной верзиерой» (рис. 5).

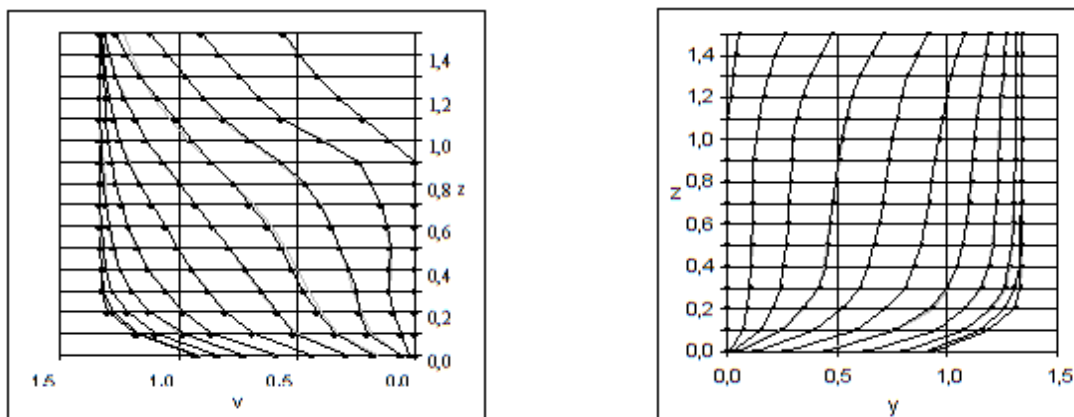


Рис. 6. Сравнение исходных и расчётных шпангоутов модели Тодда

При аппроксимации произвольных линий, заданных в системе координат судна, приходится поворачивать верзиеру и смещать её вершину. В этом случае происходит перевод уравнения верзиеры из её собственной системы координат в

$$y^3 + y^2(a_1x + a_2) + y(a_3x^2 + a_4x + a_5) + a_6x^3 + a_7x^2 + a_8x + a_9 = 0, \quad (8)$$

а шпангоута в виде (9)

$$y^3 + y^2(a_1z + a_2) + y(a_3z^2 + a_4z + a_5) + a_6z^3 + a_7z^2 + a_8z + a_9 = 0 \quad (9)$$

Для аппроксимации составлены специальные программы, так что этот процесс никаких трудностей не представляет. Подробности вывода описаны в статье [6], а здесь приводится пример точности аппроксимации шпангоутов с помощью корабельной верзиеры на рис. 6. Ватерлинии аппроксимируются, естественно, ещё точнее шпангоутов.

Получается такая **схема расчета**: 1) вычисляются коэффициенты уравнений аппроксимирующих кривых (8); 2) по полученным уравнениям ватерлиний определяются производные на форштевне и ахтерштевне; 3) по формулам (2) или (4) вычисляются главная часть интеграла и сам интеграл Мичелла.

Особенности главной части интеграла Мичелла и результаты расчетов

По новой форме интеграла Мичелла выполнено много расчетов для моделей с известными экспериментальными кривыми остаточного сопротивления. В первую очередь были выполнены расчеты сопротивления аналитических моделей В.Виглея и Г.Вейнблума (таблицы 1 и 2 в ПРИЛОЖЕНИИ). Затем в качестве известных примеров были использованы модели речных судов «Родина» и «Севан» (таблица 3). Третья группа моделей – это пять моделей Тодда 60-ой серии (таблица 4).

Для наглядности таблицы составлены в виде трёх столбцов. В первом столбце каждой таблицы приведены три кривые: 1) экспериментальная кривая остаточного сопротивления, 2) расчетная кривая Мичелла и 3) её главная часть. Во втором столбце приведены 1) та же экспериментальная кривая, 2) главная часть интеграла Мичелла и 3) кривая Мичелла, посчитанная с учетом обух поправок – поправки сдвига и поправки на турбулентность/

другую систему, начало и угол поворота которой не совпадают с системой координат верзиеры. Полученная таким путём кривая записывается в виде неявного уравнения третьего порядка. Уравнение ватерлинии получается в виде (8).

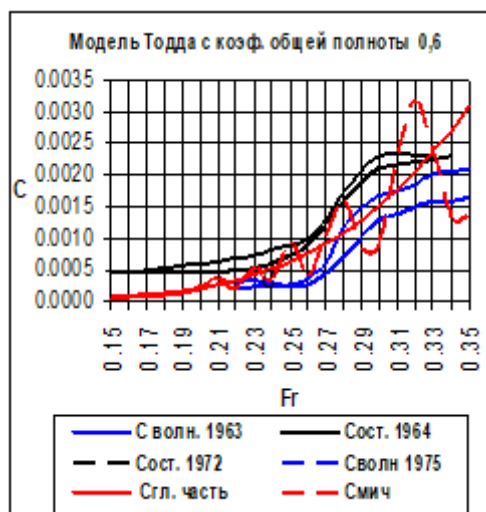


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых волнового и остаточного сопротивления

В третьем столбце приводится сравнение экспериментальной кривой остаточного сопротивления с главной частью интеграла Мичелла и определяется величина смещения главной части интеграла Мичелла до совпадения с кривой остаточного сопротивления. Это даёт величину ошибки в том случае, если в качестве кривой остаточного сопротивления взять главную часть интеграла Мичелла.

Рассмотрение относительного положения расчетных и экспериментальных кривых показало, что главная часть интеграла Мичелла проходит на числах Фруда до 0,3 – 0,32 очень близко к экспериментальной кривой у всех моделей реальных

судов. Это достаточно просто объяснить. Интерференция кельвиновских волновых систем происходит вне корпуса судна, поэтому её влияние на распределение давления по корпусу невелико. Учитывая, что главная часть интеграла Мичелла интегрирует распределение давлений по корпусу движущегося судна, она должна давать основную часть сопротивления воды движению судна. (Касательные напряжения, как известно, учитываются экстраполяторами трения)

Из таблиц 1 и 2 видно, что у десяти из восемнадцати моделей главная часть интеграла Мичелла почти совпадает с экспериментальной кривой остаточного сопротивления до числа Фруда примерно 0,30. При этом следует учесть, что отношение длины к ширине у всех моделей Виглея $D/B = 10.667$, отношение ширины к осадке $B/T = 1.5$, и у моделей Вейнблума $D/B = 10$ и $B/T = 2/5$, за исключением модели 1093, у которой $D/B = 30$ и $B/T = 2.5$. Такое большое удлинение модели 1093 объясняет то, что её расчетные кривые проходят значительно ниже экспериментальной кривой остаточного сопротивления.

Анализ показал, что в общем случае разница между экспериментальной кривой остаточного сопротивления и главной частью интеграла Мичелла не превосходит 5%. Много это или мало?

На рис. 7 приведены экспериментальные кривые остаточного и волнового сопротивления, полученные в разных бассейнах мира для одной и той же модели Тодда 60-ой серии с коэффициентом общей полноты

0,60 [6]. Легко видеть, что разница между экспериментальными кривыми волнового сопротивления составляет примерно 25%. Кривые остаточного сопротивления тоже не совпадают в пределах 15%. Если исходить из того, что мы сравниваем наши расчеты с экспериментальными кривыми, точность которых может оцениваться в тех же пределах, что и расчет, то ошибка в 5% не является существенной.

Следует учесть, что для рассмотренных реальных судов ошибка делается в опасную сторону, то на практике нужно расчетные значения увеличить для надёжности на 2% -5%.

Вывод

На основании данного исследования можно сделать важный вывод: **главную часть интеграла Мичелла** можно принимать в первом приближении за кривую остаточного сопротивления. Это особенно важно при сравнении обводов какой-нибудь серии моделей, потому что можно сравнивать гидродинамическое качество обводов без проведения дорогостоящих буксировочных испытаний.

Замечание. Полученный вывод очень важен для практического использования интеграла Мичелла, учитывая, что поправки сдвига и турбулентности пока не найдены в общем виде, и неизвестно будут ли найдены вообще.

Литература

1. Mr. J. H. Michell on the Wave-Resistance of a Ship. Philosophical Magazine, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106-123.
2. Weinblum, G.P., Kendrick J.J. & Todd M.A. 1952 Investigation of wave effects produced by a thin body – TMB Model 4125. Navy Department, the David W. Taylor Model Basin, Washington 7.DC, Report 840.
3. Sharma, S.D. 1969 Some results concerning the wavemaking of a thin ship. J. Ship Research, 13, 72-81
4. Gotman, A.Sh. A History of Ship Resistance Evaluation. – / A.Sh.Gotman // The Journal of Ocean Technology.- 2007, vol. II.- no 1.- p. 74 – 96.
5. Gotman, A.Sh. Study of Michell's Integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance. Oceanic Engineering International, 2002, 8, 2, 74 – 115.
6. Gotman, A. Residual resistance of displacement vessels.- Journal of Marine Science and Engineering (JMSE).- 2020 8(6) 400 .
7. Готман А.Ш. Аналитическое задание поверхности корпуса корабля произвольной формы Морской вестник, № 1 (33).81 – 85. 2010
8. Proceeding of the Workshop on Ship Wave Resistance computations.-Vol. 1.-1979.- David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda.- USA .- 116 p.

References

1. Mr. J. H. Michell on the Wave-Resistance of a Ship. Philosophical Magazine, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106-123.
2. Weinblum, G.P., Kendrick J.J. & Todd M.A. 1952 Investigation of wave effects produced by a thin body – TMB Model 4125. Navy Department, the David W. Taylor Model Basin, Washington 7.DC, Report 840.
3. Sharma, S.D. 1969 Some results concerning the wavemaking of a thin ship. J. Ship Research, 13, 72-81
4. Gotman, A.Sh. A History of Ship Resistance Evaluation. – / A.Sh.Gotman // The Journal of Ocean Technology.- 2007, vol. II.- no 1.- p. 74 – 96.
5. Gotman, A.Sh. Study of Michell's Integral and influence of viscosity and ship hull form on wave resistance. Oceanic Engineering International, 2002, 8, 2, 74 – 115.
6. Gotman, A. Residual resistance of displacement vessels.- Journal of Marine Science and Engineering (JMSE).- 2020 8(6) 400 .
7. Gotman, A.Sh. Analytical description of the ship hull surface of arbitrary shape. Marine bulletin , № 1 (33).81 – 85. 2010
8. Proceeding of the Workshop on Ship Wave Resistance computations.-Vol. 1.-1979.- David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda.- USA .- 116 p.

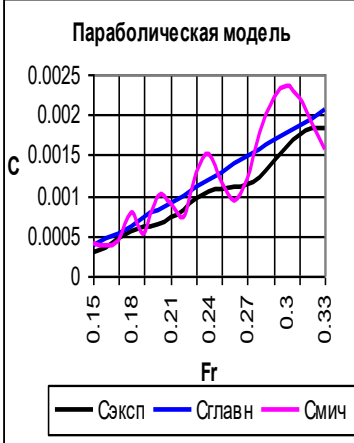
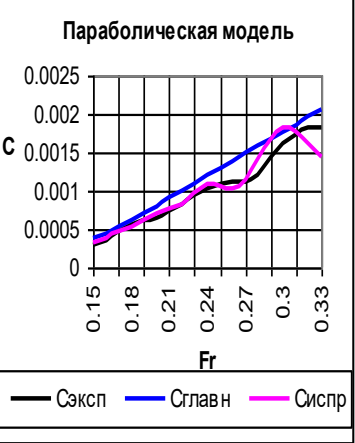
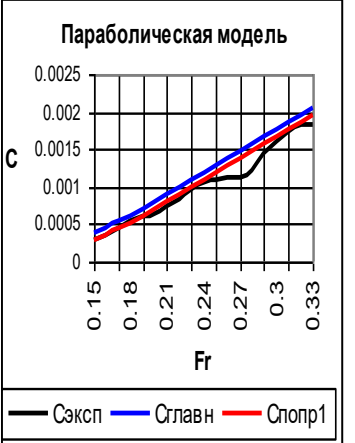
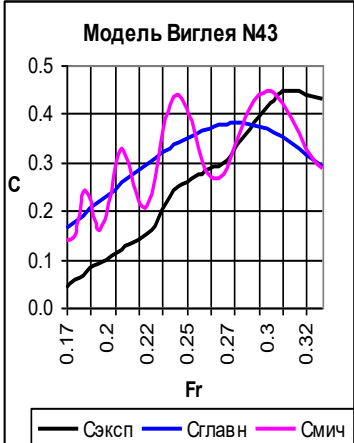
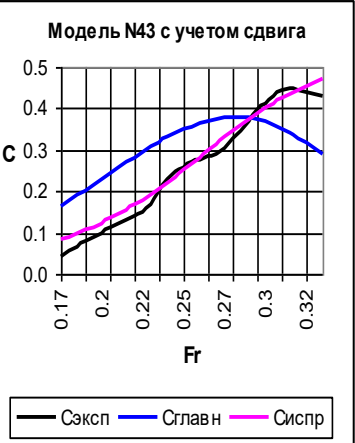
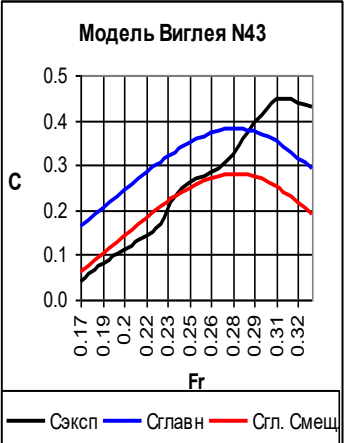
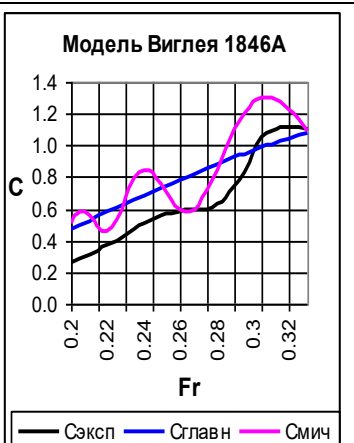
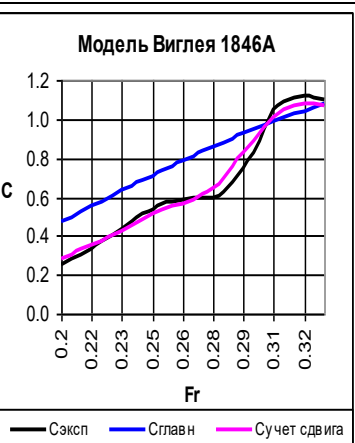
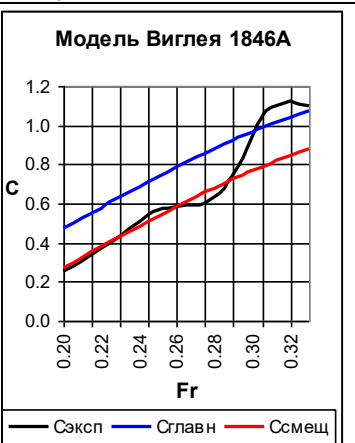
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

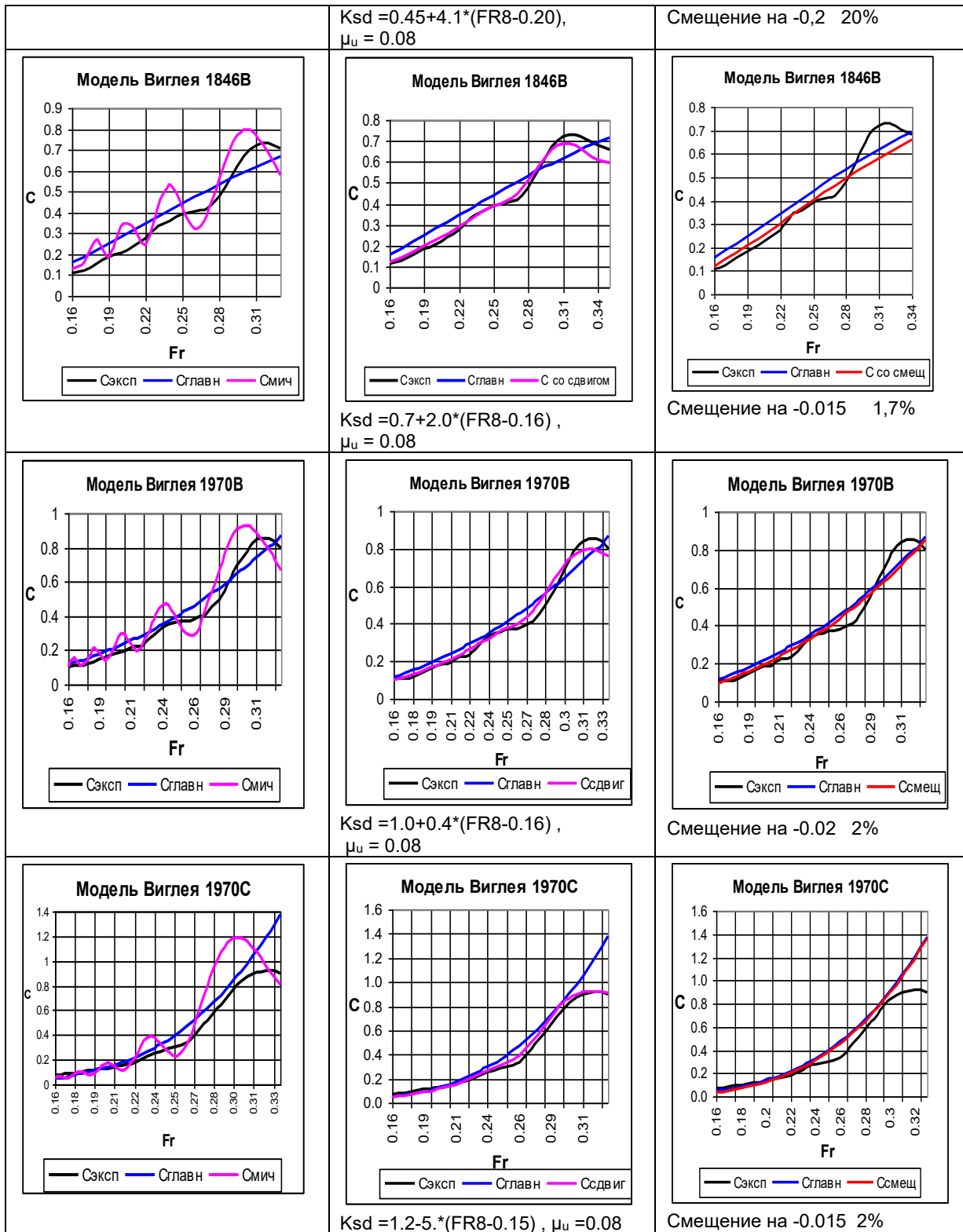
Ада Шоломовна Готман, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории и устройства корабля Сибирского государственного университета водного транспорта. 6300996 г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, Россия . e-mail: ada.gotman@yandex.ru,

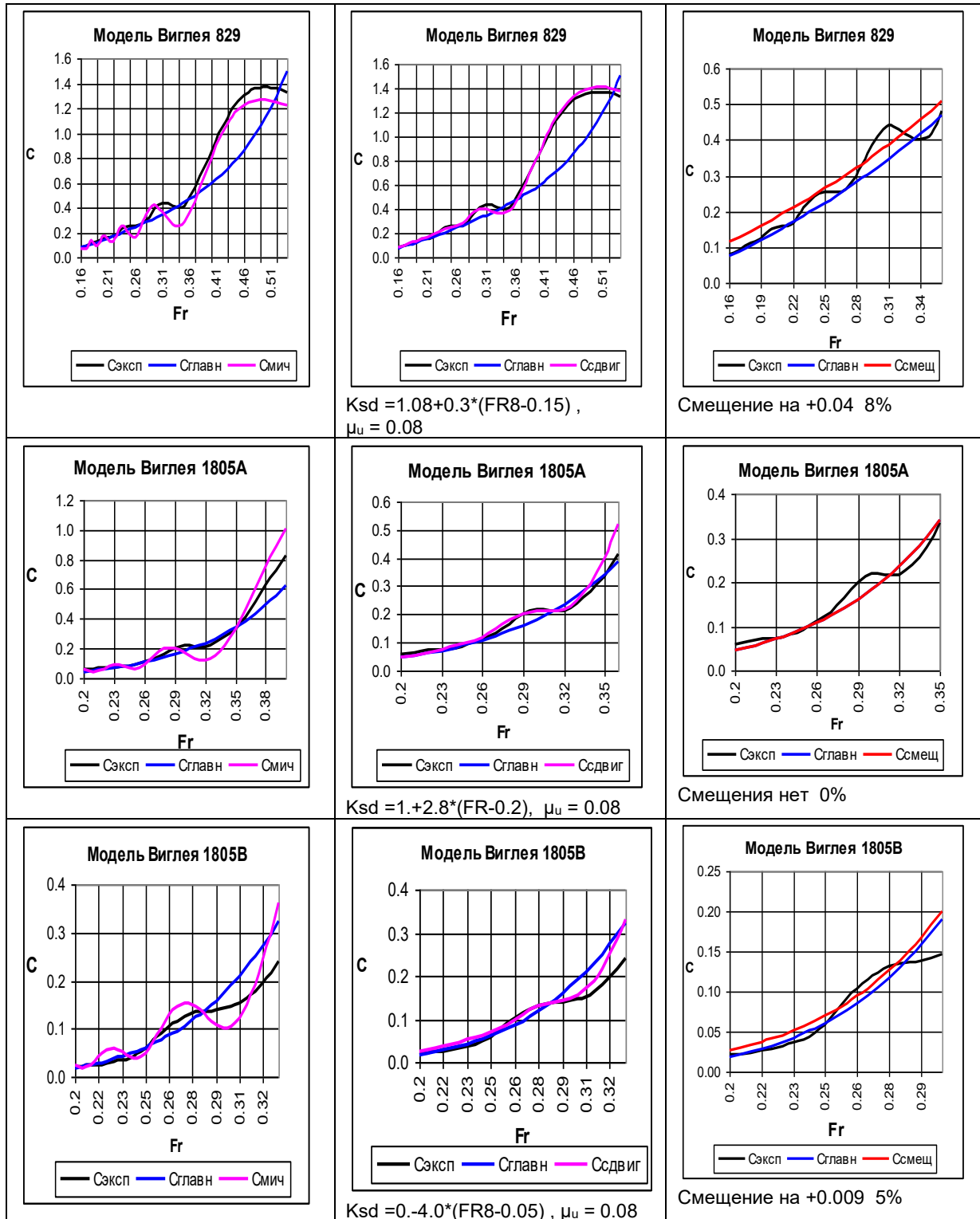
Ada Sh. Gotman Dr. Sci. (Eng). Professor, of the Department of the theory and design ship, Siberia State University of water transport, Novosibirsk, Shchetinkina st. 33, 630099, Russia, e-mail ada.gotman@yandex.ru

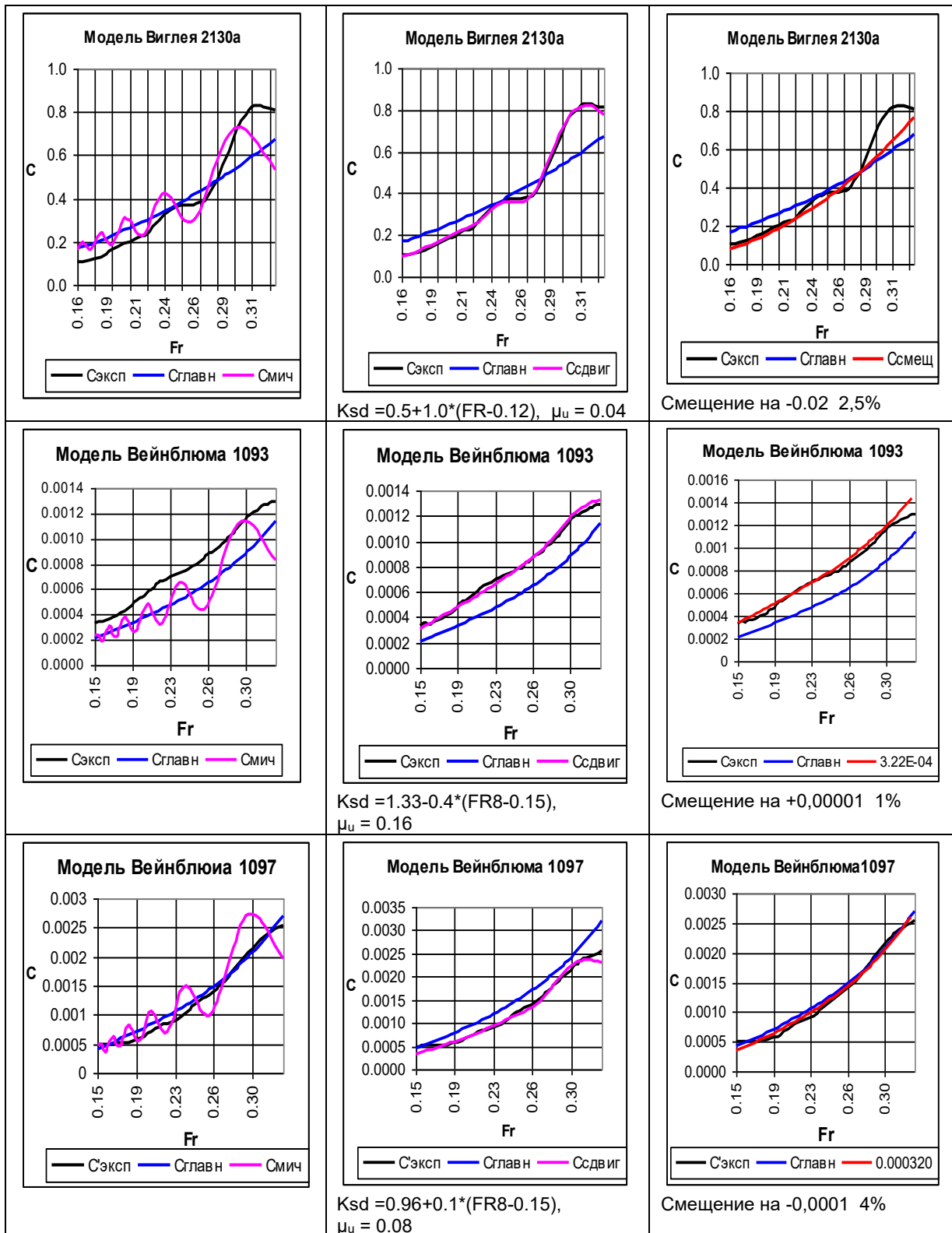
ПРИЛОЖЕНИЕ

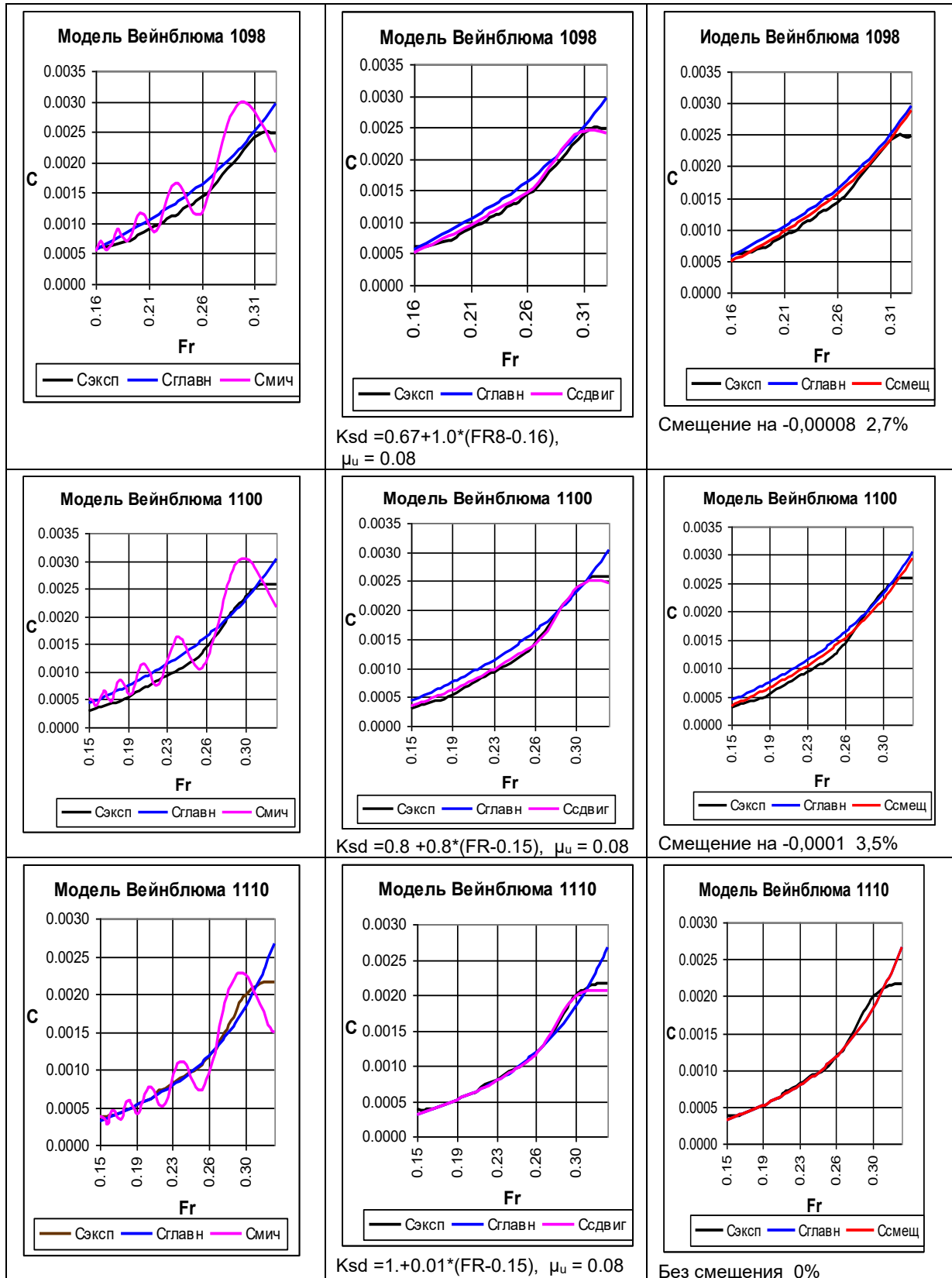
Таблица 1. Аналитические модели Виглея и Вейнблума

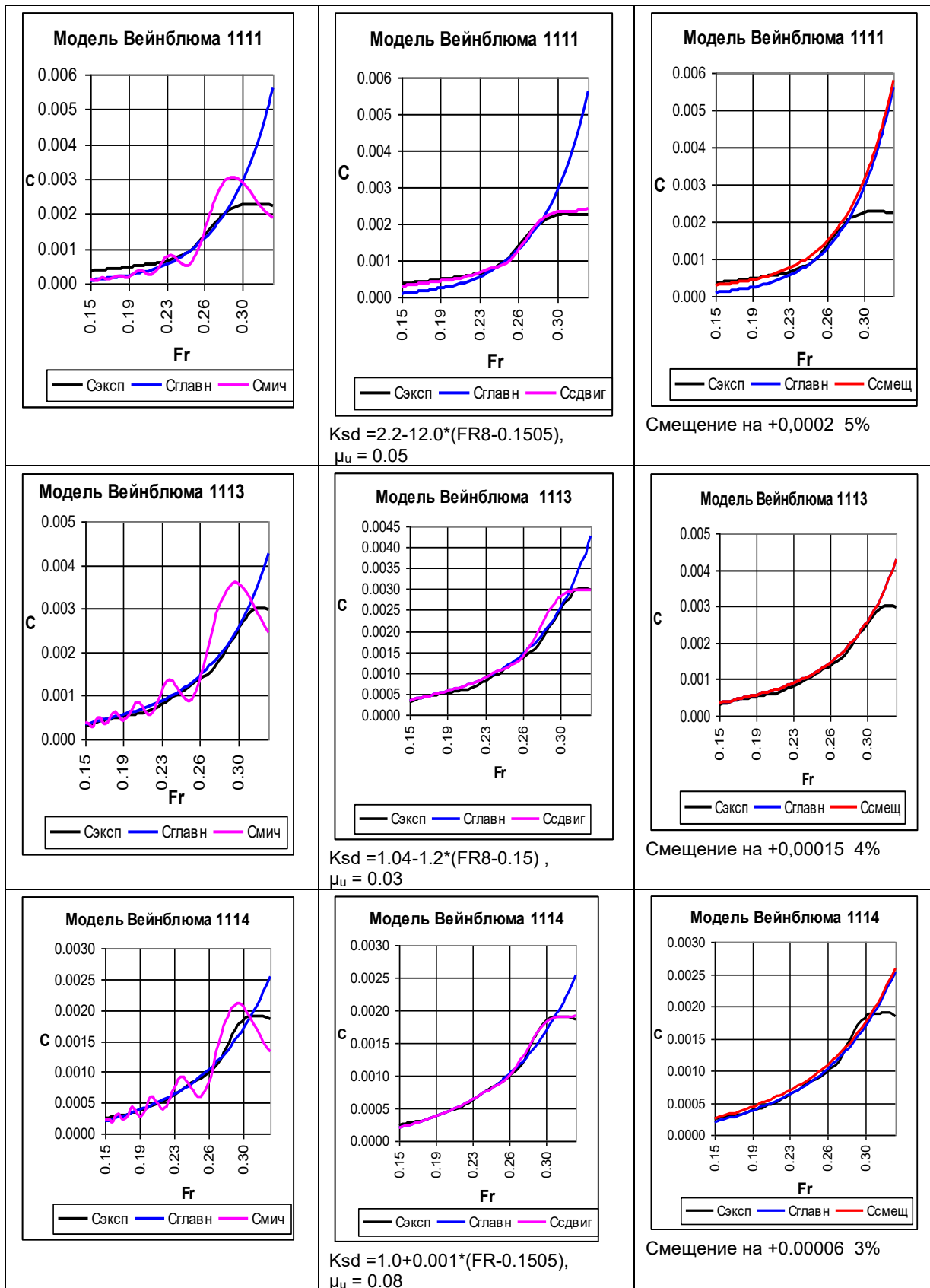
Кривая остаточного сопротивления, кривая Мичелла и её главная часть	Кривая остаточного сопротивления, главная часть и кривая Мичелла с учетом поправок сдвига и турбулентности	Кривая остаточного сопротивления, главная часть интеграла Мичелла и её смещение
<p>Параболическая модель</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Смич</p>	<p>Параболическая модель</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Сиспр</p> <p>$K_{sd} = 0.85 - 0.15 \cdot (FR - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$</p>	<p>Параболическая модель</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Стопр1</p> <p>Смещение на -0.0001 (0,5%)</p>
<p>Модель Виглея N43</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Смич</p>	<p>Модель N43 с учетом сдвига</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Сиспр</p> <p>$K_{sd} = 0.05 + 8.2 \cdot (FR - 0.17)$, $\mu_u = 0.08$</p>	<p>Модель Виглея N43</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Сгл. Смещ</p> <p>Смещение на -0.1 25%</p>
<p>Модель Виглея 1846A</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Смич</p>	<p>Модель Виглея 1846A</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Сучет сдвига</p>	<p>Модель Виглея 1846A</p>  <p>— Сэксп — Сглавн — Ссмещ</p>











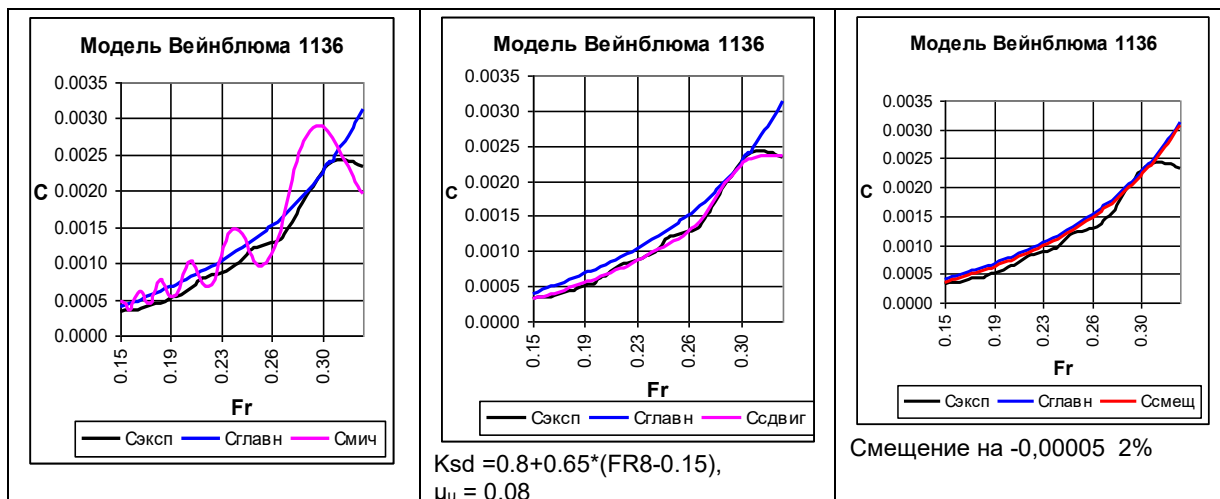
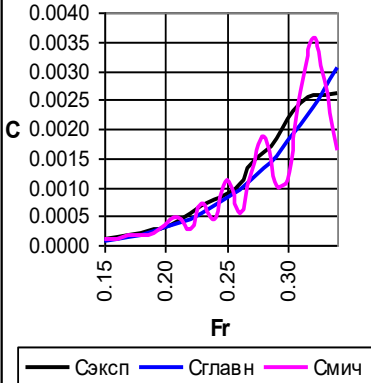
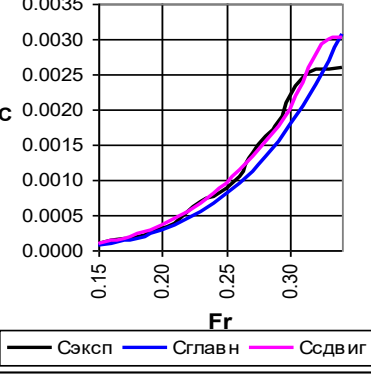
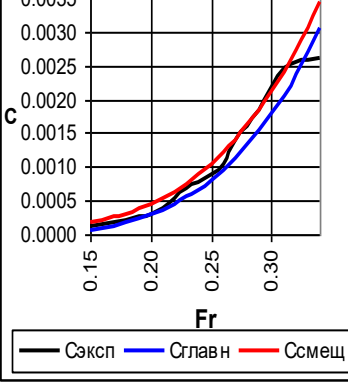
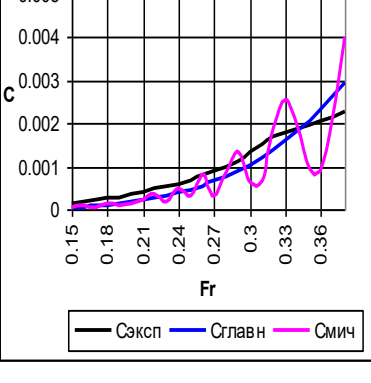
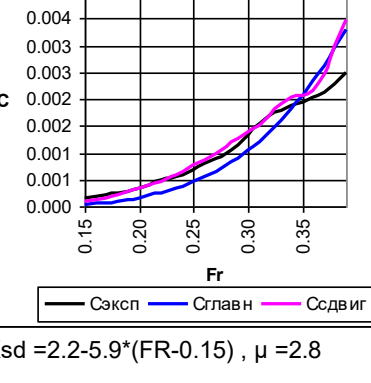
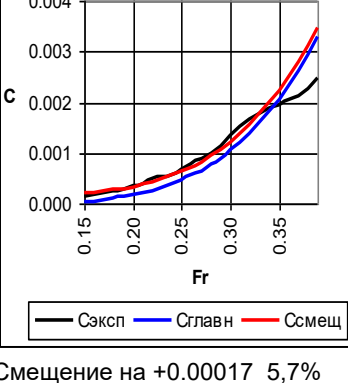
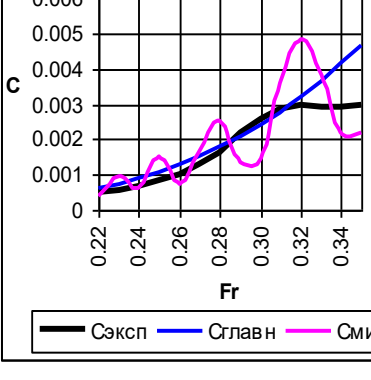
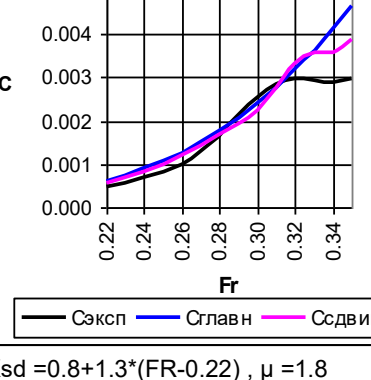
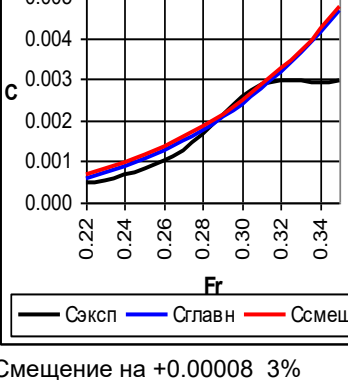


Таблица 2. Сравнение основных параметров моделей и относительных положений расчетных кривых и экспериментальных кривых остаточного сопротивления

Wigley Weinbl um Models	Angle entran ce α	f''	$(\delta + f')$	$\varphi + f'$	β	δ	Φ	Ksd – поправка сдвига, μ_u – турбулентность	$Fr < 0,3$
1805b	0.0	0,08	0,355	0,533	0,666	0,355	0,533	$K_{sd} = 0.4 \cdot (FR8 - 0.05)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1805a	4°18'	0,40	0,471	0,667	0,666	0,391	0,587	$K_{sd} = 1.2 + 2.8 \cdot (FR - 0.2)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1970c	5°18'	1,35	0,567	0,800	0,671	0,467	0,700	$K_{sd} = 1.2 - 5 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \geq R_{ost}$
1111	6.167	1,428	0,650	0,755	0,839	0,542	0,647	$K_{sd} = 2.2 - 12.0 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.05$	$R_w \approx R_{ost}$
1114	7.8	0,365	0,687	0,794	0,839	0,550	0,656 5	$K_{sd} = 1.0 + 0.001 \cdot (FR - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \geq R_{ost}$
1098	7.933	0,62	0,659	0,833	0,75	0,519	0,693	$K_{sd} = 0.67 + 1.0 \cdot (FR8 - 0.16)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
829	8°00'	0,0	0,587	0,800	0,656	0,427	0,640	$K_{sd} = 1.08 + 0.3 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
Parabol ic	11.333	-0,20	0,644	0,667	0,666	0,444	0,667	$K_{sd} = 0.85 - 0.15 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1970b	10°42'	0,15	0,667	0,900	0,671	0,467	0,700	$K_{sd} = 1.0 + 0.4 \cdot (FR8 - 0.16)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1097	13.517	-0,08	0,759	0,933	0,75	0,519	0,693	$K_{sd} = 0.96 + 0.1 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1110	13.517	-0,08	0,790	0,896	0,839	0,550	0,656	$K_{sd} = 0.8 + 0.8 \cdot (FR - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \approx R_{ost}$
1113	13.517	0,311	0,818	0,906	0,839	0,578	0,666	$K_{sd} = 1.04 - 1.2 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.03$	$R_w \approx R_{ost}$
1100	13.517	-0,08	0,819	0,930	0,839	0,579	0,690	$K_{sd} = 0.8 + 0.8 \cdot (FR - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \geq R_{ost}$
1136	13.517	-0,08	0,859	0,906	0,929	0,619	0,666	$K_{sd} = 0.8 + 0.65 \cdot (FR8 - 0.15)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \geq R_{ost}$
1846b	12°42'	-0,40	0,595	0,933	0,666	0,355	0,693	$K_{sd} = 0.7 + 2.0 \cdot (FR8 - 0.16)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w > R_{ost}$
N43	13°42'	-0,40	1,039	1,119	0,641	0,799	0,879	$K_{sd} = 0.05 + 8.2 \cdot (FR - 0.17)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \gg R_{ost}$
2130a	15°42'	-598/8	0,7D4 8	0,981	0,667	0,467	0,700	$K_{sd} = 0.5 + 1.0 \cdot (FR - 0.12)$, $\mu_u = 0.04$	$R_w \gg R_{ost}$
1846a	16°42'	0,986	0,711	0,907	0,666	0,391	0,587	$K_{sd} = 0.45 + 4.1 \cdot (FR8 - 0.20)$, $\mu_u = 0.08$	$R_w \gg R_{ost}$

Таблица 3. Модели речных судов «Родина» и «Севан»

Кривая остаточного сопротивления, кривая Мичелла и её главная часть	Кривая остаточного сопротивления, главная часть и кривая Мичелла с учетом поправок сдвига и турбулентности	Кривая остаточного сопротивления, главная часть интеграла Мичелла и её смещение
<p>Речное судно Родина</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Смич</p>	<p>Речное судно Родина</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссдвиг</p> <p>$K_{sd} = 1.55-1.9*(FR-0.15), \mu = 1.9$</p>	<p>Речное судно Родина</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссмещ</p> <p>Смещение на +0.00008 3%</p>
<p>Родина с развергив. обшивкой</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Смич</p>	<p>Родина с разв. обшивкой</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссдвиг</p> <p>$K_{sd} = 2.2-5.9*(FR-0.15), \mu = 2.8$</p>	<p>Родина с разв. обшивкой</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссмещ</p> <p>Смещение на +0.00017 5,7%</p>
<p>Речное судно Севан</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Смич</p>	<p>Речное судно Севан</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссдвиг</p> <p>$K_{sd} = 0.8+1.3*(FR-0.22), \mu = 1.8$</p>	<p>Речное судно Севан</p>  <p>— Сэксп — Сглазн — Ссмещ</p> <p>Смещение на +0.00008 3%</p>

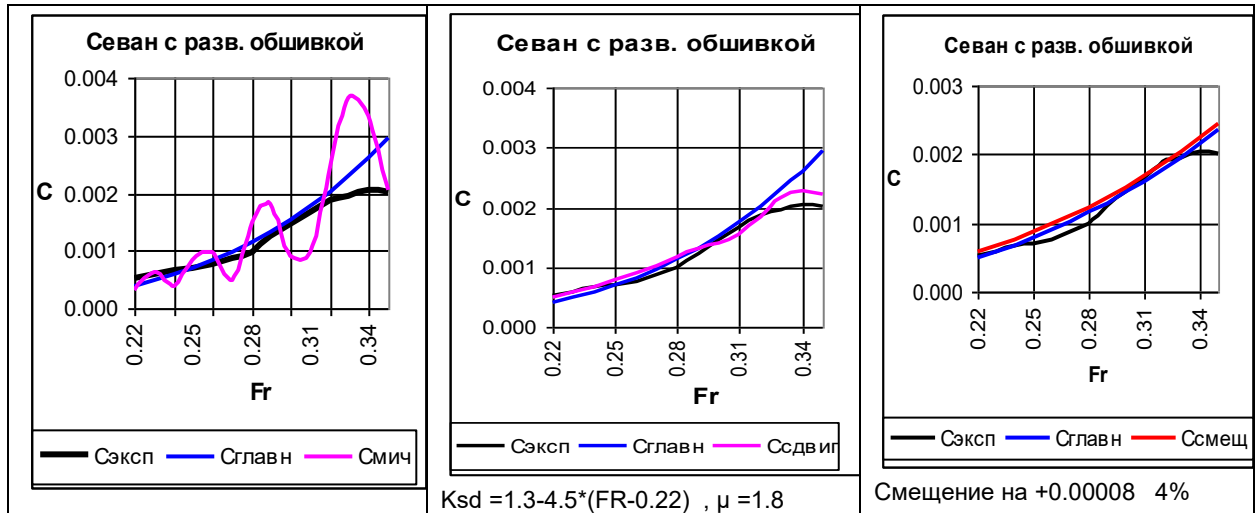
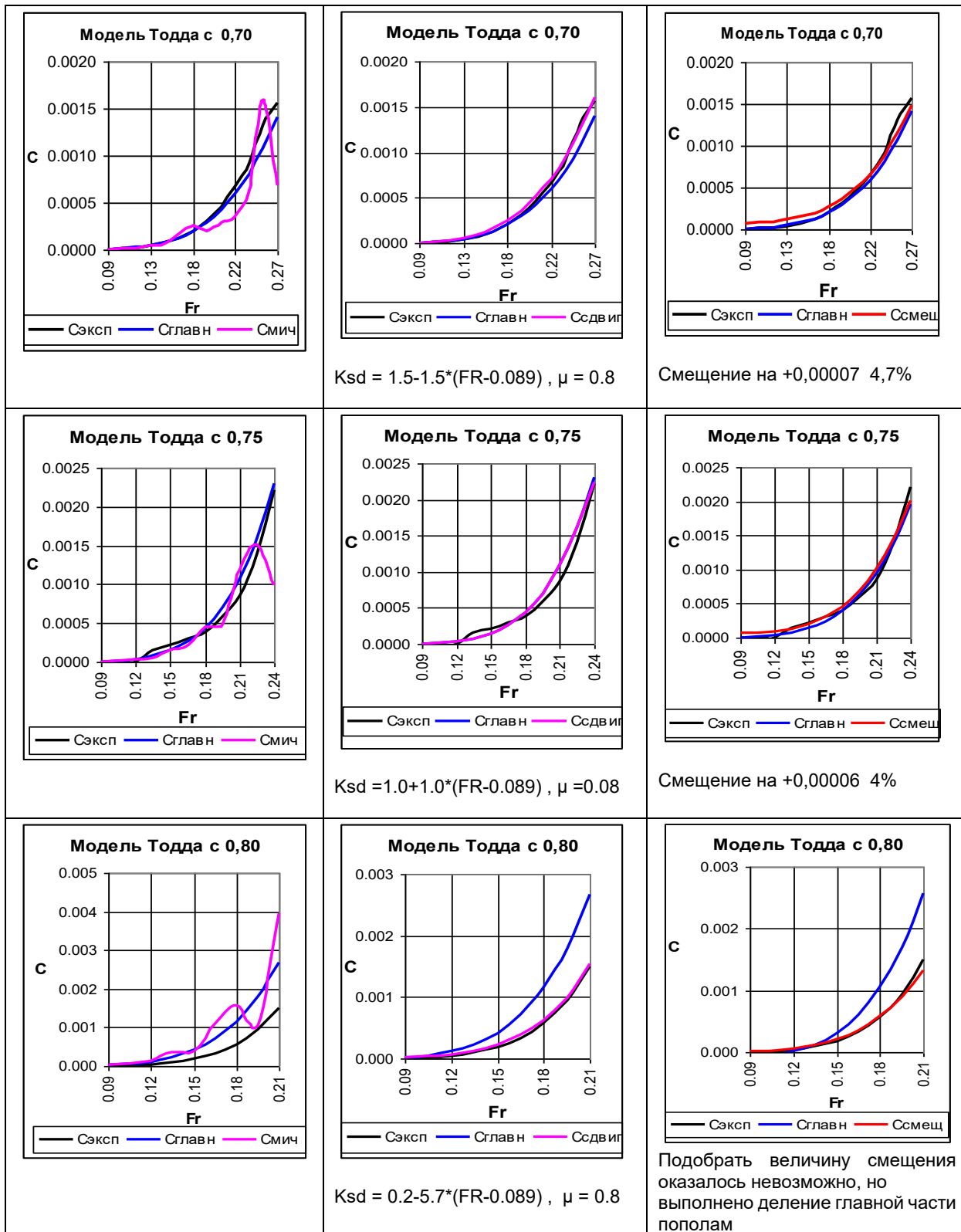


Таблица 4. Модели Тодда серии 60

Кривая остаточного сопротивления, кривая Мичелла и её главная часть	Кривая остаточного сопротивления, главная часть и кривая Мичелла с учетом поправок сдвига и турбулентности	Кривая остаточного сопротивления, главная часть интеграла Мичелла и её смещение
<p>Модель Тодда с 0,60</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Смич</p>	<p>Модель Тодда с 0,60</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Ссдвиг</p>	<p>Модель Тодда с 0,60</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Ссмещ</p>
	<p>$K_{sd} = 2.2-2.2*(FR-0.089)$, $\mu = 0.8$</p>	<p>Со смещением +0,00015 10%</p>
<p>Модель Тодда с 0,65</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Смич</p>	<p>Модель Тодда с 0,65</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Ссдвиг</p>	<p>Модель Тодда с 0,65</p> <p>— Сэксп — Сглавн — Ссмещ</p>
	<p>$K_{sd} = 1.+0.5*(FR-0.089)$, $\mu = 0.8$</p>	<p>Смещение на +0,00002 2%</p>



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.128

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.004

Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения**Часть 2 Математическое описание кромок отверстий в сферических и конических участках корпусов****С.А. Русановский¹, М.П. Худяков¹, Н.И. Черенков¹**¹ Филиал Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова

Аннотация. Статья является логическим продолжением первой части (№1, 2020), в которой была предложена методика геометрического моделирования кромок отверстий на цилиндрических участках обечеек. В этой части рассмотрено математическое описание кромок отверстий в сферических и конических участках корпусов. Показано, что поверхность кромки отверстий может быть описана как дважды косо цилиндрический или косо конический в зависимости от требований к разделке. Полученные выражения для описания кромок отверстий могут быть представлены в аналитическом и матричном виде (в однородных координатах). Также полученные выражения могут быть использованы в качестве промежуточного этапа в предложенной методике проектирования технологических комплексов. Отмечено, что получаемую криволинейную направляющую разделки кромки можно использовать в качестве связи между обрабатываемым изделием и обрабатывающим инструментом для механической обработки кромок отверстий с помощью нестационарных технологических комплексов.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, формообразование, методика, объекты подводного кораблестроения, прочный корпус, варка насыщения, кромка отверстия, линейчатая поверхность.

Method for modeling a bore chamfer in a hull within the scope of submarine shipbuilding for welding-in of outfitting**Part 2 Mathematical description of hole groove in spherical and conical sections of hulls****Sergey A. Rusanovskiy¹, Mikhail P. Khudyakov¹, Nikolai I. Cherenkov¹**¹Branch of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Abstract. The article is a logical continuation of the first part (No. 1, 2020), in which a method for geometric modeling of hole grooves on cylindrical sections of shells has been proposed. Mathematical description of hole grooves in spherical and conical sections of hulls has been studied in the current part. It is shown that surface of a hole groove can be described as double oblique cylindrical or oblique conoid depending on groove preparation. Received expressions for describing the hole grooves can be shown in analytical and matrix form (in uniform coordinates). Also received expressions can be used as an intermediate stage in the proposed methodology for the design of process systems. It is noted that the resulting curvilinear groove guide can be used as a connection between the workpiece and the machining tool for machining the hole grooves using non-stationary process systems.

Key words: computer-aided design systems, shaping, methodology, submarine shipbuilding, strong hull, outfitting welding-in, hole groove, ruled surface.

Введение (Introduction)

В части 1 статьи [1] была изложена методика геометрического моделирования поверхности фаски кромок отверстий.

Основное научное назначение разрабатываемой методики – это верификация математических моделей пространственно-сложных разделок в корпусных конструкциях океанотехники, полученных в результате отработки методики проектирования технологических комплексов для их изготовления. Например – нестационарного комплекса по обработке кромок отверстий [2].

В качестве математических моделей рассматриваются уравнения в унифицированной матричной форме. Благодаря этому полученная математическая модель инвариантна относительно вида проектной задачи (прямая, или обратная).

Важное практическое достоинство предлагаемой методики – это возможность автоматизированного получения геометрии разделки кромок в САПР на основе булевых операций. Это позволяет при помощи типовых конструкторских действий сократить время геометрических построений, повысить их точность и качество. Появляется возможность прямой передачи полученной геометрической информации в специализированное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ).

Для дальнейшего расширения практической части методики [1] целесообразно рассмотреть возможные варианты математического описания кромок отверстий в сферических и конических участках корпусов объектов подводного кораблестроения.

1. Методы и Материалы (Methods and Materials)

Применяемый в настоящее время для описания геометрии разделки кромок подход основан на классических методах начертательной геометрии и табличном представлении дискретных данных. Даже при использовании трехмерных или твердотельных систем автоматизированного проектирования (САПР) этот подход не создает условий для автоматизированного получения геометрии разделки кромок, тем более – для их обработки с помощью ЧПУ [3, 8, 10].

При существующих требованиях нормативных документов [4] поверхность разделки кромок отверстия под вварку цилиндрического насыщения для произвольной геометрии поверхности корпуса корабля можно описать поверхность дважды косоуго цилиндриоида. Она образуется движением прямолинейной образующей, пересекающей ось отверстия. При этом образующая касается двух криволинейных направляющих, задающих границы разделки, как на рисунке 3 статьи [1]. Если для задания поверхности фаски использовать только первую криволинейную направляющую при постоянном угле отклонения образующей от оси отверстия (требования нормативных документов), то дважды косоуго цилиндриоид вырождается в косоуго коноид.

Как было показано в [1], криволинейную направляющую можно представить в виде сопряженных круговых дуг или биарок [4, 5, 6, 7, 9, 10].

Если судовая поверхность представима в аналитическом виде [11], то по крайней мере одна из криволинейных направляющих разделки (ее гребешок) также выражается в аналитической форме. Она представляет собой уравнение линии пересечения судовой поверхности и цилиндрической поверхности насыщения.

2. Результаты (Results)

Рассмотрим пересечение поверхностей цилиндрического насыщения и корпуса на сферических и конических участках, и получим уравнения линий их пересечения.

При рассмотрении пересечения цилиндра и сферы (участка прочного корпуса ПЛ) начало общей системы координат $OXYZ$ разместим в центре сферы, направив ось OX из кормы в нос, ось OY – на левый борт (правая система координат, принятая в машиностроении), ось OZ – перпендикулярно первым двум и вверх. В этом случае плоскость XOZ будет совпадать с диаметральной плоскостью корабельной системы координат, а плоскости XOY и YOZ параллельны соответственно основной плоскости и плоскости мидель-шпангоута. При поворотных преобразованиях системы координат положительные углы поворота отсчитываются против направления часовой стрелки.

Пусть ось цилиндра насыщения перпендикулярна основной плоскости и пересекает плоскость XOY в точке $x = a, y = b$, рис. 1. Радиус сферы обозначим R , радиус цилиндра – R_1 , приняв для определенности $R > R_1$.

В общей системе координат $OXYZ$ уравнение сферы имеет вид

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (1)$$

В той же системе координат уравнение цилиндра при наложенных выше ограничениях запишется следующим образом

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R_1^2 \text{ при } -\infty < z < \infty \quad (2)$$

Найдем линию пересечения поверхностей сферы и проходящего через нее цилиндра. Для удобства введем местную систему координат $O_1X_1Y_1Z_1$, связанную с цилиндром. За центр O_1 системы координат примем точку, находящуюся на пересечении оси этого цилиндра с плоскостью XOY общей системы координат. Ось O_1Z_1 направим вдоль оси цилиндра параллельно оси OZ , а оси O_1X_1 и O_1Y_1 параллельно осям OX и OY , соответственно.

Таким образом, связь между системами координат $OXYZ$ и $O_1X_1Y_1Z_1$ описывается соотношениями

$$x = x_1 + a, y = y_1 + b, z = z_1. \quad (3)$$

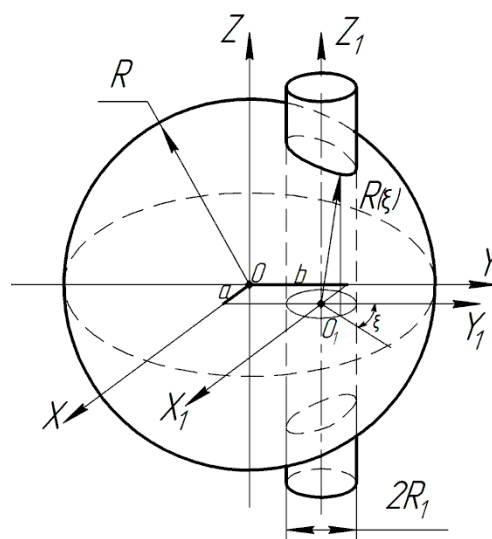


Рис. 1. Пересечение сферы и цилиндра

В местной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ положение точек пересечения сферы и цилиндра определяется концом радиус-вектора $R(\xi)$. Угловой параметр ξ характеризует положение его конца в проекции на плоскость $X_1O_1Y_1$. Он же определяет движение фрезы вдоль кромки обрабатываемого отверстия. Так как проекция линии пересечения на плоскость $X_1O_1Y_1$ представляет собой окружность радиуса R_1 , то координаты проекции вектора $R(\xi)$, на плоскость $X_1O_1Y_1$ будут определяться формулами

$$x_1 = R_1 \sin \xi, \quad (4)$$

$$y_1 = R_1 \cos \xi.$$

Для определения z_1 нужно воспользоваться уравнением (1), которое с учетом зависимостей (3) перепишем в виде

$$(x_1+a)^2 + (y_1+b)^2 + z_1^2 = R^2. \quad (5)$$

Подстановка (4) в (5) дает выражение для координаты z_1 линии пересечения

$$z_1 = \pm \sqrt{R^2 - (R_1 \sin \xi + a)^2 - (R_1 \cos \xi + b)^2} \quad (6)$$

Объединяя зависимости (4) и (6), получаем искомые параметрические уравнения линии пересечения сферы и цилиндра в местной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$

$$\begin{aligned} x_1 &= R_1 \sin \xi \\ y_1 &= R_1 \cos \xi \\ z_1 &= \pm \sqrt{R^2 - (R_1 \sin \xi + a)^2 - (R_1 \cos \xi + b)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Наличие знака “±” в выражениях (6) и (7) и далее, для координаты z_1 указывает, что при пересечении сферы и цилиндра образуется две линии пересечения – выше и ниже плоскости $X_1O_1Y_1$, различающиеся знаками координаты z_1 . Для получения уравнений линии пересечения в общей системе координат $OXYZ$ необходимо подставить выражения (7) в (3), что приводит к соотношениям

$$\begin{aligned} x &= R_1 \sin \xi + a \\ y &= R_1 \cos \xi + b \\ z &= \pm \sqrt{R^2 - (R_1 \sin \xi + a)^2 - (R_1 \cos \xi + b)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

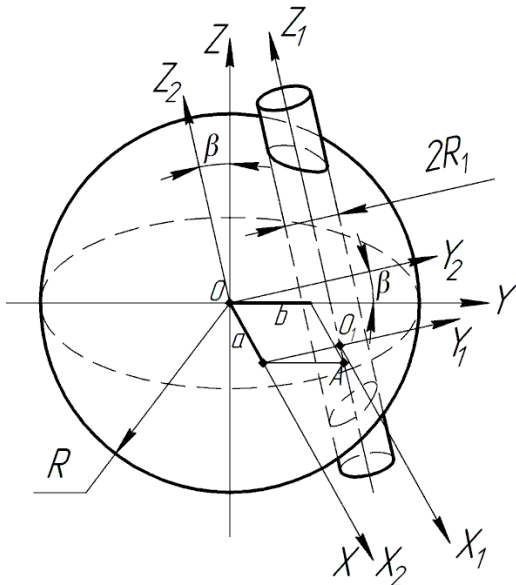


Рис.2. Наклон цилиндра в плоскости мидель-шпангоута

Уравнения (7) и (8) можно использовать для получения уравнений пересечения сферы и цилиндра, если ось цилиндра повернута относительно одной из осей OY или OZ . Пусть ось цилиндра находится в плоскости, перпендикулярной оси OX , т.е. параллельна мидель-шпангоуту, и наклонена к оси OZ на угол α . И пусть координаты точки A пересечения оси цилиндра с плоскостью XOY равны $x = a$ и $y = b$, см. рис. 2. Введем вспомогательную систему координат $Ox_2Y_2Z_2$, начало которой совпадает с началом общей системы координат, т.е. с точкой O , а плоскость X_2OY_2 перпендикулярна оси цилиндра. Ее связь с местной системой координат $O_1X_1Y_1Z_1$ будет определяться соотношениями, аналогичными (3).

$$x_2 = x_1 + a, \quad y_2 = y_1 + b \cos \alpha, \quad z_2 = z_1, \quad (9)$$

Таким образом, для линии пересечения в системе координат $Ox_2Y_2Z_2$ получаем уравнения

$$\begin{aligned} x_2 &= R_1 \sin \xi + a \\ y_2 &= R_1 \cos \xi + b \cos \alpha \\ z_2 &= \pm \sqrt{R^2 - (R_1 \sin \xi + a)^2 - (R_1 \cos \xi + b \cos \alpha)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Переход от системы координат $Ox_2Y_2Z_2$ к системе координат $OXYZ$ выполняется поворотом вокруг OX на угол α и может быть осуществлен через матрицу углового преобразования координат

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [A_X] \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } [A_X] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

а компоненты вектора $\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ определяется выражениями (10).

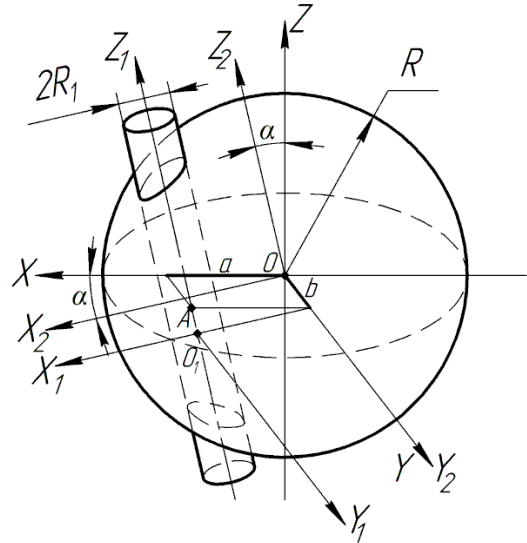


Рис.3. Наклон цилиндра в диаметральной плоскости

Аналогичным образом определяются уравнения линии пересечения сферы и цилиндра для случая, когда ось цилиндра находится в плоскости, параллельной плоскости XOZ (т.е. параллельна ДП), и наклонена к оси OZ на угол β , см. рис. 3. Координаты точки A пересечения оси цилиндра с плоскостью XOZ равны $x = a$ и $y = b$. Также как и в предыдущем случае, вспомогательная система координат $Ox_2Y_2Z_2$ вводится так, чтобы ее начало совпадало с началом общей системы координат, а плоскость X_2OZ_2 была перпендикулярна оси цилиндра. Уравнения линии пересечения во вспомогательной системе координат по аналогии с предыдущей задачей имеют вид

$$x_2 = R_1 \sin \xi + a \cos \beta$$

$$\begin{aligned} y_2 &= R_1 \cos \xi + b \\ z_2 &= \pm \sqrt{R^2 - (R_1 \sin \xi + a \cos \beta)^2 - (R_1 \cos \xi + b)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Переход к общей системе координат $OXYZ$ осуществляется с помощью ее поворота на угол β относительно оси OY до совмещения с системой координат $Ox_2Y_2Z_2$ с матрицей углового преобразования $[A_Y]$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [A_Y] \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\text{где } [A_Y] = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix},$$

а компоненты вектора $\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$ определяются выражениями (12).

Значительная часть цилиндрического насыщения вваривается в конические части подводных судов. Поэтому важным представляется получить уравнения линии пересечения конического участка корпуса с телесным углом 2σ и цилиндрического насыщения.

Рассмотрим круговой конус корпуса и цилиндр насыщения с диаметром меньшим диаметра поперечных сечений конуса, рис. 4. Будем по-прежнему пользоваться системой координат $OXYZ$, в которой ось OX направлена по оси конуса (участка прочного корпуса ПЛ) из кормы в нос, ось OY направлена на левый борт, ось OZ перпендикулярна первым двум и направлена вверх.

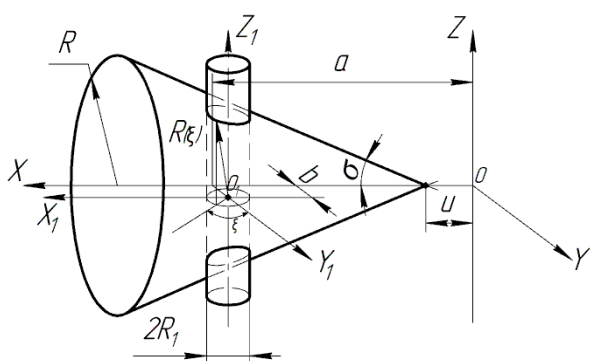


Рис. 4. Пересечение конуса и цилиндра

Ось цилиндра перпендикулярна основной плоскости и отстоит от плоскости мидель-шпангоута на расстоянии a , и на расстоянии b от ДП, см. рис.4. Отстояние вершины конуса от миделя равно u .

В общей системе координат $OXYZ$ уравнение конуса имеет вид

$$y^2 + z^2 = (x - u)^2 \operatorname{tg}^2 \sigma,$$

или

$$z^2 = (x - u)^2 \operatorname{tg}^2 \sigma - y^2 \quad (14)$$

В той же системе координат уравнение цилиндра при наложенных выше ограничениях запишется следующим образом

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R_1^2 \text{ при } -\infty < z < \infty \quad (15)$$

Получим уравнения линии пересечения конуса и цилиндра. Также, как и в случае сферы и цилиндра, введем в рассмотрение местную систему координат, связанную с цилиндром насыщения $O_1X_1Y_1Z_1$. При принятых выше обозначениях связь между местной $O_1X_1Y_1Z_1$ и общей $OXYZ$ системами координат будет определяться соотношениями (3).

Рассматривая далее координаты радиуса-вектора $R(\xi)$ точек линии пересечения конуса и цилиндра, можно получить параметрические уравнения линии пересечения конуса и цилиндра, которые в местной системе координат имеют вид

$$\begin{aligned} x_1 &= R_1 \sin \xi \\ y_1 &= R_1 \cos \xi \\ z_1 &= \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \sigma (R_1 \sin \xi - u)^2 - (R_1 \cos \xi)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнения линии пересечения конуса и цилиндра в общей системе координат $OXYZ$ получаются подстановкой (16) в (3):

$$\begin{aligned} x &= R_1 \sin \xi + a \\ y &= R_1 \cos \xi + b \\ z &= \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \sigma (R_1 \sin \xi + a - u)^2 - (R_1 \cos \xi + b)^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Если ось цилиндра находится в плоскости параллельной плоскости мидель-шпангоута или диаметральной плоскости и наклонена к оси OZ на некоторый угол ($\pm\alpha$ или $\pm\beta$), то уравнения пересечения конуса и наклоненного цилиндра в общей системе координат $OXYZ$ будут аналогичны уравнениям (11) и (13) при соответствующих видоизменениях выражений (17).

3. Обсуждение (Discussion)

Более сложным является вопрос получения уравнений линии пересечения оболочки судового корпуса (цилиндрической, сферической, или конической формы) с цилиндром насыщения при произвольном положении оси цилиндра насыщения, рис. 5.

Стандартным способом преобразования координатных систем в этом случае является матрица направляющих косинусов, связывающая две координатные системы с общим началом. В рамках рассматриваемой задачи необходимые преобразования координат можно значительно упростить за счет специального выбора ориентации координатных осей вспомогательной системы координат.

Пусть ось цилиндра насыщения, см. рис. 5, образует с осями OX, OY, OZ общей системы координат $OXYZ$ углы $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ и пересекает плоскость XOY в точке $M(a, b, 0)$. Ось цилиндра насыщения может быть задана и другими способами, например, точками $M(a, b, 0)$ и $N(u, v, w)$. Введем вспомогательную систему координат $Ox_2y_2z_2$, плоскость X_2OY_2 которой перпендикулярна оси цилиндра насыщения, а начало совпадает с началом общей системы координат $OXYZ$. Ось Ox_2 данной системы целесообразно расположить в плоскости XOZ , которая является диаметральной плоскостью корпуса, а ось Oy_2 направим перпендикулярно плоскости X_2OZ_2 таким образом, чтобы система координат $Ox_2y_2z_2$ была бы правой. Как видно из рис. 5, ось OY в этом случае будет образовывать с осью Ox_2 прямой угол и находиться в плоскости X_2OZ_2 . Обозначим угол между осями Ox и Ox_2 через α , угол между осями Oy и Oy_2 через β .

Координаты точки O_1 пересечения оси цилиндра насыщения с плоскостью X_2OY_2 в системе координат $Ox_2y_2z_2$, как следует из рисунка 5, равны

$$\begin{aligned} x_2 &= a \cos \alpha \\ y_2 &= b \cos \alpha \\ z_2 &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Выберем точку O_1 в качестве начала координат системы $O_1x_1y_1z_1$, оси которой направим параллельно осям координатной системы $Ox_2y_2z_2$. Связь между осями этих координатных систем описывается известными соотношениями

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + a_2 \cos \alpha, \\ y_2 &= y_1 + b_2 \cos \beta, \\ z_2 &= z_1, \end{aligned} \quad (19)$$

где a_2 и b_2 – координаты точки пересечения оси цилиндра с плоскостью X_2OY_2 в системе координат $OX_2Y_2Z_2$.

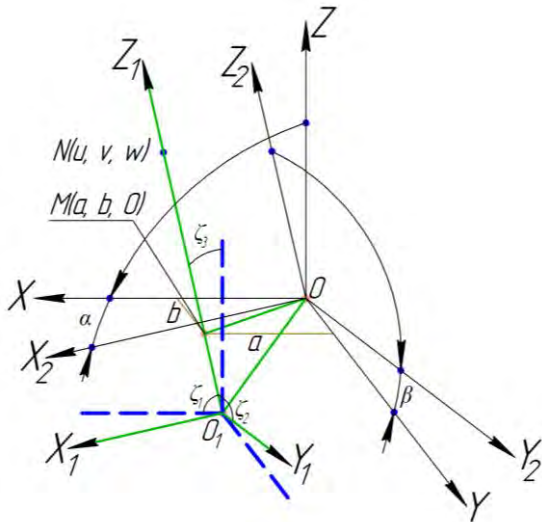


Рис. 5. Общая $OXYZ$ и вспомогательные системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$ при произвольном положении оси цилиндра насыщения

Анализируя вышеизложенное, можно заметить, что задача о нахождении линии пересечения цилиндра насыщения при произвольном положении его оси с судовой поверхностью сводится к ранее рассмотренной задаче о линии пересечения цилиндра со сферой (а также кругового цилиндра и конуса) при расположении оси цилиндра перпендикулярно основной плоскости. В этом случае параметрические уравнения линии пересечения имеют вид аналогичный (10), (12):

$$\begin{aligned} x_2 &= R_2 \sin \xi + a_2 \cos \alpha \\ y_2 &= R_2 \cos \xi + b_2 \cos \beta \end{aligned} \quad (20)$$

$$z_3 = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \xi + a_2 \cos \alpha)^2 - (R_2 \cos \xi + b_2 \cos \beta)^2}$$

Обратим внимание, что при выбранном положении осей вспомогательной системы координат $OX_2Y_2Z_2$ переход в уравнениях (20) к координатам общей системы координат $OXYZ$, как и в предыдущих случаях с наклоненной осью цилиндра насыщения, может быть выполнен упрощенным способом с помощью последовательных поворотов системы координат $OXYZ$ на углы α и β .

Первый поворот системы координат $OXYZ$ выполняется вокруг оси OY на угол α до совмещения оси OX с осью OX_2 . В результате система $OXYZ$ преобразуется в систему $OX_3Y_3Z_3$, см рис. 6. Так как плоскости XOZ и X_3OZ_3 совпадают, то при поворотах для произвольной точки $P(x, y, z)$ изменятся только координаты x и z , координата y останется прежней, т.е. имеет место плоское вращение системы координат, что приводит к зависимостям:

$$\begin{aligned} x &= x_3 \cos \alpha - z_3 \sin \alpha \\ y &= y_3 \\ z &= x_3 \sin \alpha + z_3 \cos \alpha \end{aligned} \quad (21)$$

В выражениях (21) координаты (x, y, z) определяют в системе координат $OXYZ$ точку $P(x, y, z)$. Эту же точку

$P(x_3, y_3, z_3)$ в системе $OX_3Y_3Z_3$ определяют координаты (x_3, y_3, z_3) .

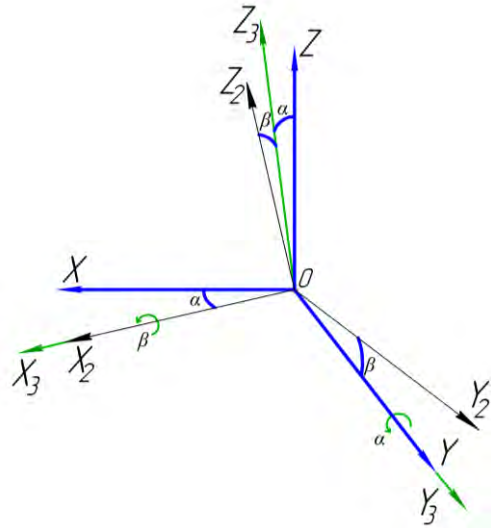


Рис. 6. Повороты системы координат $OXYZ$ для совмещения со вспомогательной системой координат $OX_2Y_2Z_2$

В результате первого поворота новое положение плоскости YOZ , т.е. плоскость Y_3OZ_3 будет совпадать с плоскостью Y_2OZ_2 . Поэтому второе вращение совершаем вокруг оси OX_3 на угол β ($0 \leq \beta \leq \pi$) от оси OY_3 до оси OY_2 , при этом ось OZ_3 примет положение OZ_2 . В результате система координат $OX_3Y_3Z_3$ преобразуется в систему $OX_2Y_2Z_2$. Так как здесь также имеет место плоское вращение системы координат, то:

$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 \\ y_3 &= y_2 \cos \beta + z_2 \sin \beta \\ z_3 &= -y_2 \sin \beta + z_2 \cos \beta \end{aligned} \quad (22)$$

Выражения (22) определяют связь координат точки P в системе координат $OX_3Y_3Z_3$ с координатами этой же точки в системе $OX_2Y_2Z_2$.

Если теперь подставить (22) в (21), то получим формулы преобразования координат в пространстве для случая, когда система координат $OX_2Y_2Z_2$ вращается относительно неподвижной системы $OXYZ$, причём точка O общая:

$$\begin{aligned} x &= x_2 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha \sin \beta - z_2 \sin \alpha \cos \beta \\ y &= y_2 \cos \beta + z_2 \sin \beta \\ z &= -x_2 \sin \alpha - y_2 \cos \alpha \sin \beta + z_2 \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \quad (23)$$

Формулы (23) применимы для определения координат линии пересечения поверхностей судовых оболочек вращения (цилиндр, сфера, конус) с цилиндром насыщения.

Для записи в одном матричном уравнении преобразований поворота и параллельного переноса целесообразно применить однородные координаты. Тогда каждое конкретное преобразование (сдвиг вдоль оси, поворот вокруг оси) может быть представлено в форме матрицы унифицированного вида размера 4×4 . А суммарное преобразование – в виде произведения этих матриц [12].

Также метод однородных координат чаще всего используют для описания координатных преобразований в робототехнике и программно-управляемых технологических комплексах [2].

Переход к однородным координатам осуществляется переходом в матричных выражения от матриц третьего порядка к матрицам четвертого порядка. Например, выражения (21) и (22) могут быть представлены в матричном виде в однородных координатах:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [A_Y] \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = [A_X] \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где $[A_X]$ и $[A_Y]$ расширенные до четвертого порядка матрицы из выражений (11) и (13):

$$[A_Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[A_X] = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Подстановка (24) в (25) приводит к матричной формулировке зависимостей (23):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [A_Y][A_X] \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

где

$$[A] = [A_Y][A_X] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \sin\beta & -\sin\alpha \cos\beta & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ \sin\alpha & -\cos\alpha \sin\beta & \cos\alpha \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Если требуется к операциям вращения системы координат добавить операции параллельного переноса, то к произведению матриц $[A_Y][A_X]$ добавляется еще один множитель в виде матрицы переноса $[T]$. Так, выражения (19), определяющие этот перенос в системе координат $Ox_2y_2z_2$, в матричном виде будут иметь вид

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \cos\alpha \\ 0 & 1 & 0 & b_2 \cos\beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

И тогда, подставив (28) в (27), получим окончательную цепочку преобразований, связывающую систему координат цилиндра насыщения с общей системой координат

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = [A_Y][A_X][T] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Для механической обработки кромок отверстий в корпусах судов с помощью программно-управляемых технологических комплексов целесообразно использовать линию кромки фаски, получаемой пересечением оболочки корпуса с внешней поверхностью цилиндра насыщения, в качестве

связи между обрабатываемым изделием и обрабатывающим инструментом. На ее основе можно создавать модели формообразования, режущего инструмента, оборудования, и системы управления технологическим комплексом в целом.

В качестве примера рассмотрим обработку кромок цилиндрического отверстия, расположенного в цилиндрической части корпуса параллельно плоскости мидель-шпангоута изделия. Тогда связь между точками обрабатываемой поверхности и положением инструмента может быть выражена в унифицированном виде матричным уравнением [2]:

$$\begin{bmatrix} x(\xi) \\ y(\xi) \\ z(\xi) \\ 1 \end{bmatrix} = [A_T] \begin{bmatrix} x_T(\xi) \\ y_T(\xi) \\ z_T(\xi) \\ 1 \end{bmatrix} = \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d_0}{2} \cos\xi \\ \frac{d_0}{2} (\sin\xi + a) \cos\alpha - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2} \sin\xi + a\right)^2} \sin\beta \\ \frac{d_0}{2} (\sin\xi + a) \sin\alpha + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2} \sin\xi + a\right)^2} \cos\beta \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow = \quad (30)$$

В уравнении (30) обозначены:

$[A_T]$ – стандартная матрица геометрических преобразований координат характерных точек из системы координат инструмента в систему координат обрабатываемой поверхности;

$\begin{bmatrix} x_T(\xi) \\ y_T(\xi) \\ z_T(\xi) \\ 1 \end{bmatrix} = [V_T]$ – вектор координат характерных точек инструмента;

$\begin{bmatrix} x(\xi) \\ y(\xi) \\ z(\xi) \\ 1 \end{bmatrix} = [V]$ – вектор координат характерных точек обрабатываемой поверхности;

d_0 – диаметр отверстия, на кромке которого выполняется разделка;

D – внешний диаметр корпуса, в котором выполняется отверстие под варку насыщения;

ξ – угловой параметр мгновенного положения сечения обрабатываемого отверстия, определяемый по часовой стрелке вокруг оси OZ с отсчетом от плоскости мидель-шпангоута;

a – смещение оси обрабатываемого отверстия от диаметральной плоскости корпуса изделия;

β – угол наклона оси обрабатываемого отверстия к оси OZ корпуса изделия в плоскости, параллельной YOZ.

В уравнении (28) левая часть соответствует параметрическому представлению линии пересечения корпуса и цилиндра насыщения. Правая часть уравнения определяет траекторию движения инструмента.

Уравнение (30) представляет решение прямой задачи формообразования, т.е. получение уравнения поверхности при заданном уравнении инструментальной поверхности. Обратная задача формообразования, т.е. определение уравнения инструментальной поверхности, необходимого для заданного формообразования поверхности разделки будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} x_T(\xi) \\ y_T(\xi) \\ z_T(\xi) \\ 1 \end{bmatrix} = [A_T]^{-1} \begin{bmatrix} x(\xi) \\ y(\xi) \\ z(\xi) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где $[A_T]^{-1}$ – обратная матрице $[A_T]$ матрица преобразования координат поверхности разделки в инструментальную поверхность.

Заключение (Conclusion)

Получено математическое описание геометрии разделки кромок отверстий под вварку цилиндрического насыщения в конические и сферические участки корпуса корабля.

Установлено, что поверхность разделки может быть представлена в виде линейчатой поверхности дважды косоугольного цилиндрического насыщения или косоугольного коноида. Показана возможность использования линий пересечения цилиндрического насыщения с корпусом корабля для задания геометрии разделки. Получены параметрические уравнения для описания линии пересечения цилиндрического насыщения с корпусом корабля при различной ориентации оси этого насыщения относительно плоскостей корабельной системы координат для наиболее распространенных вариантов геометрии корпуса.

Литература

1. Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под вварку насыщения / Русановский С.А., Худяков М.П., Черенков Н.И. // Морские интеллектуальные технологии, — 2020. — №1. — том 1. — С. 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006
2. Русановский С. А. Проектирование технологических комплексов. Часть 2. Применение методики для нестационарных технологических комплексов / С. А. Русановский, М. П. Худяков // Вестник машиностроения. — 2020. — № 8. — С. 26–29. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-8-26-29
3. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В.В. Веселков, М.А. Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — №1(29). — С. 82-89.
4. Русановский С. А. Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003
5. Yang X. Efficient circular arc interpolation based on active tolerance control / X.Yang // Comp.-Aided design, — 2002. — vol. 34. — issue 1. — Pp. 1037–1046.
6. Park H. Error-bounded biarc approximation of planar curves / H.Park // Comp.-Aided design, — 2004. — vol. 36. — issue 12. — Pp. 1241–1251. DOI: 10.1016/j.cad.2004.01.001.
7. Marciniak K. Approximation of spirals by piecewise curves of fewest circular arc segments / Marciniak K., Putz B. // Comp.-Aided design, — 1984. — vol.16. — issue 2. — Pp. 87–90.
8. Yeung M. Curve fitting with arc splines for NC tool path generation / Yeung M, Walton DJ. // Comp.-Aided design, — 1994. — vol.26. — issue 11. — Pp. 845–849.
9. Rosin PL. A survey and comparison of traditional piecewise circular approximations to the ellipse / Rosin PL. // Computer Aided Geometric Design, — 1999. — vol.16.— Pp. 269–286.
10. Qiu H. Optimal circular arc interpolation for NC tool path generation in curve contour manufacturing / Qiu H, Cheng K, Li Y. // Comp.-Aided design, — 1997. — vol.19. — issue 11. — Pp. 751–760.
11. Кривошапко С. Н. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. — М.: Наука, 2006. — 544 с.
12. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / Выгодский М. Я. — М.: Физматгиз, 1963. — 872 с.

References

1. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Nikolai I. Cherenkov. Metodika modelirovaniya faski otverstij v korpusah ob'ektov podvodnogo korablestroeniya pod vvaruku nasysshhenija [Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges]. Marine intellectual technologies, № 1 part 1, (2020): 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006
2. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov. Proektirovanie tehnologicheskikh kompleksov. Chast' 2. Primenenie metodiki dlja nestacionarnyh tehnologicheskikh kompleksov [Design of technological complexes. Part 2. Nonstationary Systems]. Vestnik mashinostroeniya 8 (2020): 26-29. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-8-26-29
3. Veselkov, V. V. and M.A. Kobec. Principy realizacii i razvitiya tekhnologii avtomatizirovannogo izgotovleniya korpusnyh konstrukcij [Principles of implementation and development of the technology of automated manufacturing of housing structures]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 1(29) (2015): 82–89.
4. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, and Nikolai I. Cherenkov. Modelirovanie formoobrazovaniya kromok otverstij v korpusah ob'ektov podvodnogo korablestroeniya [Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 10.5 (2018): 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.
5. Yang, Xunnian. Efficient circular arc interpolation based on active tolerance control. Computer-Aided Design 34.1 (2002): 1037–1046. DOI: 10.1016/S0010-4485(01)00164-6.
6. Hyungjun Park. Error-bounded biarc approximation of planar curves. Computer-Aided Design 36.12 (2004): 1241–1251. DOI: 10.1016/j.cad.2004.01.001.
7. Marciniak K., Putz B. Approximation of spirals by piecewise curves of fewest circular arc segments. Computer-Aided Design 1984; 16(2): 87-90.

8. Yeung M, Walton DJ. Curve fitting with arc splines for NC tool path generation. Computer-Aided Design 26.11 (1994): 845-849.
9. Rosin PL. A survey and comparison of traditional piecewise circular approximations to the ellipse. Computer Aided Geometric Design 16 (1999): 269-286.
10. Qiu H, Cheng K, Li Y. Optimal circular arc interpolation for NC tool path generation in curve contour manufacturing. Computer-Aided Design 19.11 (1997): 751-760.
11. Krivoschapko, S. N. and V. N. Ivanov and S. M. Halabi. Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informaciya k raschetu na prochnost' tonkih obolochek [Analytical surfaces: 500 surface geometry materials and thin shell strength analysis]. M.: Nauka, 2006.
12. Vygodskij M. Ja. Spravochnik po vysshej matematike [Handbook of Higher Mathematics]. M.: Fizmathgiz, 1963.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Александрович Русановский, старший преподаватель кафедры кораблестроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Михаил Павлович Худяков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии металлов и машиностроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Николай Иванович Черенков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения, Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова» в г. Северодвинске, 164500, Российская Федерация, г. Северодвинск, ул. Воронина, 6, e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

Sergey A. Rusanovskiy, The senior lecturer, the senior lecturer of department of shipbuilding, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Mikhail P. Khudyakov, The associate professor, Ph.D. (Eng), The associate professor of department of technology of metals and mechanical engineering, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Nikolai I. Cherenkov, The associate professor, Ph.D. (Eng), The associate professor of department of shipbuilding, Branch of Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov» in Severodvinsk, 6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500, Russian Federation, e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

Расчётное обоснование замены армирующего наполнителя композитного корпуса судна катамаранного типа

М.В. Ховайко¹, А.О. Осипова¹, А.С. Немов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Аннотация. Статья посвящена вопросам проектирования корпусов судов из полимерных композиционных материалов. В качестве объекта исследования рассматривается прототип судна-катамарана. Целью работы является модификация композитного корпуса прототипа, предполагающая замену армирующего элемента в композиционном материале с углеродных волокон на стеклянные в целях снижения стоимости конструкции. Основными задачами работы являются разработка модифицированной структуры элементов конструкции корпуса на основе анализа прочности, а также анализ экономической эффективности выполненной модификации.

Анализ прочности композитных конструкций корпуса выполняется с помощью прямого конечно-элементного (КЭ) моделирования с применением системы КЭ анализа ANSYS Mechanical APDL. Расчётная методика основана на требованиях классификационных сообществ DNV GL и Российского морского регистра судоходства (РМРС).

В результате работы на основе многовариантного конечно-элементного анализа выполнена модификация существующего проекта судна под материал с существенно отличающимися прочностными и жесткостными характеристиками при минимальном изменении геометрии корпусных элементов. Обоснована возможность уменьшения затрат на материал корпуса в 1.5-2- раза при незначительном увеличении водоизмещения и с условием обеспечения прочности корпуса в соответствии с требованиями международных и российских классификационных сообществ.

Ключевые слова: композиционные материалы, углепластики, стеклопластики, судостроение, катамаран, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, водоизмещение.

Calculation justification for replacing the strengtheing agent of the composite hull of the catamaran type vessel

Mikhail V. Khovaiko¹, Anna O. Osipova¹, Alexander S. Nemov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. The article is devoted to the issues of designing ship hulls from polymer composite materials. A prototype of a catamaran ship is considered as an object of research. The aim of the work is to modify the composite body of the prototype, which involves replacing the strengthening element in the composite material from carbon fibers to glass ones in order to reduce the cost of the structure. The main tasks of the work are the development of a modified structure of the hull structural elements based on the strength analysis, as well as the analysis of the economic efficiency of the modification.

Strength analysis of composite hull structures is performed using direct finite element (FE) modeling using the ANSYS Mechanical APDL FE analysis system. The calculation method is based on the requirements of the classification associations (DNV GL) and the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS).

As a result of the work, on the basis of multivariate finite element analysis, the existing ship design has been modified for material with significantly different strength and stiffness characteristics with minimal changes in the geometry of the hull members. The possibility of reducing the cost of the hull material by 1.5-2 times with a slight increase in displacement and with the condition of ensuring the strength of the hull in accordance with the requirements of international and Russian classification associations has been substantiated.

Keywords: composite materials, carbon plastics, fiberglass, shipbuilding, catamaran, finite element method, stress-strain state, displacement.

Введение

На сегодняшний день композиционные материалы получили широкое распространение в конструкциях кораблей и судов различного назначения [1-6]. Их основные преимущества по сравнению с традиционными материалами (сталь, алюминий): меньшая масса при более высоких прочностных характеристиках [1,7]. Композиционные материалы применяются как в конструкциях корпусов в целом [3,6,7] так и в надстройках и отдельных элементах конструкции, таких как люки, мачты [3,4]. Наиболее распространенными типами композиционных материалов, используемых в судостроении, являются полимерные слоистые

композиты, армированных углеродными и стеклянными волокнами [5,6,8].

При проектировании корпусов судов из композиционных материалов необходимо учитывать их преимущества и недостатки для создания оптимальной конструкции по своим механическим характеристикам и конечной стоимости постройки судна [4,9]. Преимуществом углеволокон перед стекловолокнами является большая прочность при меньшей плотности и, соответственно, меньшей массе. Тем не менее, серьезным фактором, сдерживающим применение углепластиков, является высокая стоимость углеволокон: от 25 \$/кг (для высокопрочных углеволокон) до 134 \$/кг (для высокомодульных углеволокон). Применение стекловолокон, стоимость которых 1.63-3.26 \$/кг,

предпочтительно с экономической точки зрения. Оценки стоимости волокон приведены в соответствии данными базы Granta Mi [10].

Цель исследования, приведенного в настоящей статье, – модификация композиционного корпуса судна-катамарана. Исходный проект предполагает применение углепластиков на основе винилэфирных связующих в конструкциях палубы, обшивки и силового набора. Предложенная модификация заключается в замене углеволокон в качестве армирующего наполнителя элементов конструкции палубы и обшивки на стеклянные волокна, при сохранении типа связующего и технологии изготовления.

Элементы конструкции из композиционных материалов создаются на судостроительном предприятии из исходных компонентов (волокон и связующих) в соответствии с заводскими техническими условиями. Необходимо отметить, что механические характеристики композиционных материалов, значительно отличаются от характеристик компонентов. Например, если прочностные характеристики углепластиков при растяжении в 1.5-2 раза выше аналогичных характеристик стеклопластиков [11,12], то при сжатии, отличие пределов прочности композиционных материалов с данными армирующими компонентами составляет лишь 10-20% [8]. Таким образом, результат перепроектирования будет существенно зависеть от характера нагружения объекта исследования, а процесс перепроектирования должен сопровождаться соответствующим расчётом напряженно-деформированного состояния.

В ходе перепроектирования в настоящем исследовании выполняется расчет на прочность методом прямого конечно элементного анализа. Данный метод применяется в расчётах как общей [13-16] так и местной прочности [17-20]. Особенностям применения метода конечных элементов в судостроении посвящено большое количество научно-исследовательских работ и научных статей. Так, статья Shuangxi Xu, Bin Liu a,b, Y. Garbatov, Weiguo Wu, C. Guedes Soares 2019 года посвящена конечно-элементному расчёту общей прочности и прочности поперечных связей катамарана, изготовленного из традиционных материалов: стали и алюминия [15]. При этом нагруженное состояние представлено только одним расчётным случаем – прогиб корпуса при опоре в носовой и кормовой частях. В статье Pei Zhiyong, Ma Zhongyuan, Zhu Bo, Wu Weiguo 2020 года исследуется влияние надстройки на напряженно-деформированное состояние корпуса судна [14]. Исследование выполнено путем конечно-элементного расчёта общей прочности. По результатам исследования вносятся изменения в конструкцию надстройки, без изменения материалов и конструкции корпуса. Статья Ераносьяна К.С., Маслича Е.А. и Федонюка Н.Н. 2018 года [6] посвящена модификации судна из композиционных материалов путем уменьшения количества трудоемких поперечных связей корпуса. Проверочные расчёты на прочность и устойчивость выполнены методом конечных элементов.

Таким образом, несмотря на то, что конечно-элементное моделирование последнее время

успешно применяются в судостроении при проектировании судов различного класса, в том числе из композиционных материалов, проблемы, связанные с заменой типа армирующего наполнителя при перепроектировании судовых конструкций недостаточно исследованы в опубликованных работах. Особенность исследования, представленного в настоящей статье, связана с модификацией существующего проекта судна под материал с существенно иными прочностными характеристиками, которое предполагает:

- минимальные изменения геометрии корпуса;
- определение необходимого увеличения толщин элементов корпуса для обеспечения его прочности;
- обоснование внесенных изменений путем детального конечно-элементного анализа в соответствии с правилами классификационных обществ.

Объект исследования

Объектом исследования является корпус научно-исследовательского судна катамаранного типа. Основные геометрические и эксплуатационные параметры судна представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры корпуса прототипа

Длина корпуса по ватерлинии, м	23.7
Ширина корпуса наибольшая, м	9.2
Максимальная эксплуатационная скорость, узлов	10
Район эксплуатации	R3

Водоизмещение прототипа судна из углепластика – 89.0 т.

На основе геометрической модели судна построена конечно-элементная модель корпуса. На рис. 1. представлен общий вид модели корпуса и силового набора, а также увеличенные фрагменты конечно-элементной сетки.

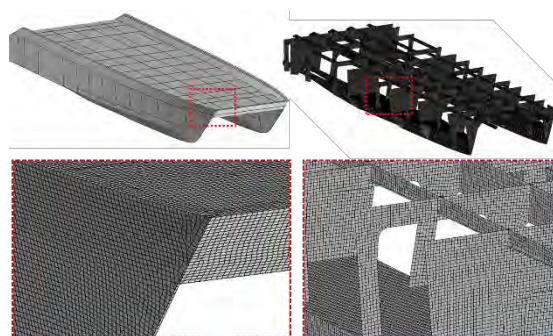


Рис. 1. Конечно-элементная модель корпуса судна-прототипа.

Для выполнения конечно-элементных расчётов конечно элементная модель интегрирована в систему ANSYS Mechanical APDL. В составе конечно элементной модели используются линейные оболочечные элементы shell181 (в конструкциях обшивки корпуса, палубы и силового набора) а также одномерные элементы – точечные массы mass21 (для учета массивных судовых агрегатов – главных двигателей, генераторов, цистерн, валопроводов и

рулевых устройств). Также элементы mass21 использованы для моделирования воздействия от надстройки. Конечно-элементная модель состоит из 442105 элементов и 388114 узлов.

Элементы конструкции корпуса представляют собой трехслойные панели, состоящие из двух несущих слоев композиционного материала, разделенных пенопластовым наполнителем. На рис. 2 представлена структура элемента обшивки моста. Толщина пенопластового наполнителя: 3 см; толщина несущего слоя композита: 4 мм

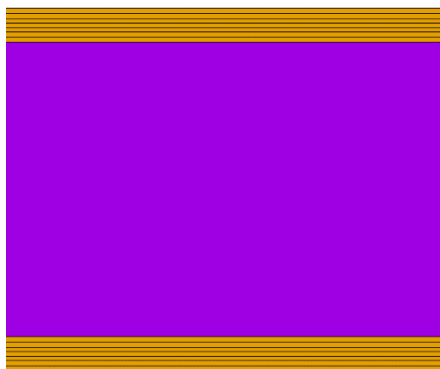


Рис. 2. Структура слоев обшивки

Несущие слои, в свою очередь состоят из нескольких монослоев толщиной 0.5 мм. Количество монослоев в несущих слоях элементов обшивки, палубы и силового набора: от 4 до 10.

В исходной конфигурации несущих слоев использован композиционный материал на основе углеродной ткани LT650-C10-R2VE (волокна Toгау T700) и винилэфирной матрицы 510A-40. Физико-механические характеристики материала приведены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Свойства исходного углепластика

Модули упругости, ГПа	x	56.7
	y	57.1
Коэффициенты Пуассона	xy	0.07
	yz	0.04
	xz	0.04
Модули сдвига, ГПа	xy	4.20
	yz	3.90
	xz	3.90
Пределы прочности при растяжении, МПа	x	1126
	y	1037
Пределы прочности при сжатии, МПа	x	450
	y	387
Пределы прочности при сдвиге, МПа	xy	47.5
	yz	59.3
	xz	59.3

Расчетная методика

Методика расчётов общей прочности сформирована на основе норм DNV-GL. Нормы данного классификационного сообщества являются наиболее адаптированными для расчётов легких и скоростных судов из композиционных материалов и успешно используются для расчёта судов, близких по своим параметрам к рассматриваемому судну-прототипу [16]. Ниже представлен перечень расчётных случаев общей прочности:

1. Прогиб корпуса с опорами в носовой и кормовой частях (Hollow landing)
2. Перегиб корпуса с опорой в области миделева сечения (Crest landing)
3. Кручения корпуса вокруг продольной и поперечной осей (torsional/pitch connecting moment)
4. Комбинированный случай нагружения 1 (80% нагрузки изгиба корпуса; 60% нагрузки кручения корпуса)
5. Комбинированный случай нагружения 2 (60% нагрузки изгиба корпуса; 80% нагрузки кручения корпуса)
6. Воздействие боковой нагрузки (Transverse split force)

Нагрузки определены для известных геометрических и эксплуатационных параметров на основе норм DNV-GL [21,22].

В качестве критерия прочности используется критерий максимальных напряжений. Нормы прочности определены на основе требований РМРС [23]. В табл. 3 приведены максимальные значения критерия прочности для различных элементов конструкции судна.

Таблица 3

Максимальные значения критерия прочности

Палуба	0.33
Переборки	0.42
Обшивка ниже ватерлинии	0.36
Обшивка выше ватерлинии	0.39

Модифицированная стеклопластиковая конструкция корпуса

В модифицированной конфигурации несущих слоев элементов корпуса использован композиционный материал на основе стеклотканей FGI-1800 и винилэфирной матрицы 510A-40. Физико-механические характеристики материала приведены в табл. 4 [8].

Таблица 4

Свойства стеклопластика

Модули упругости, ГПа	x	22.2
	y	20.3
Коэффициенты Пуассона	xy	0.14
	yz	0.17
	xz	0.17
Модули сдвига, ГПа	xy	5.01
	yz	3.30
	xz	3.30
Пределы прочности при растяжении, МПа	x	359
	y	436
Пределы прочности при сжатии, МПа	x	314
	y	389
Пределы прочности при сдвиге, МПа	xy	40.3
	yz	57.1
	xz	57.1

По результатам модификации корпуса катамарана были увеличены толщины элементов обшивки днища (на 40 %) и обшивки моста (на 10%) Изменения толщин палубы и обшивки бортов составляют менее 5% .

Результаты численного расчета общей прочности модифицированного корпуса и их анализ

По результатам конечно-элементных расчётов определены распределения перемещений корпуса, а также рассчитаны значения критерия прочности палубы, обшивки и силового набора для каждого расчетного случая.

По результатам расчётов установлено, что наиболее опасными с точки зрения прочности корпуса являются следующие случаи нагружения:

1. Прогиб;
2. Кручение;
3. Комбинированный случай нагружения 2.

На рис. 3. приведены распределения вертикальных перемещений корпуса для данных случаев нагружения. По результатам конечно-элементного анализа деформированного состояния корпуса установлено, что, за счёт увеличения толщин элементов корпуса (палубы и обшивки ниже ватерлинии), максимальные значения перемещений не превосходят аналогичные значения для исходной углепластиковой конструкции.

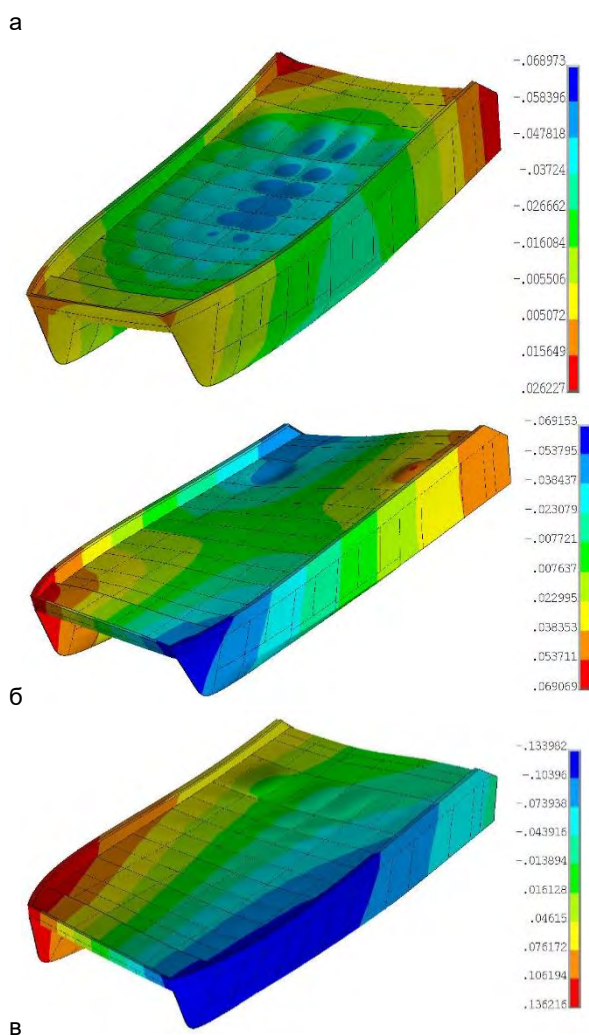


Рис. 3. Распределение вертикальных перемещений корпуса (м) при: а) прогибе, б) кручении, в) комбинированном нагружении

По результатам анализа напряженного состояния элементов конструкции корпуса, установлено, что при прогибе и перегибе наиболее нагружены палуба и обшивка днища. При кручении наибольшие напряжения зафиксированы в переборках. Комбинированное нагружение характеризуется максимальной нагрузкой на все элементы конструкции, прежде всего, на переборки и обшивку моста. Случай воздействия боковой нагрузки характеризуется наименьшими напряжениями во всех элементах конструкции. На рис. 4. приведены распределения критерия прочности (максимальных напряжений) для комбинированного случая нагружения 2, который является наиболее опасным с точки зрения прочности всего корпуса.

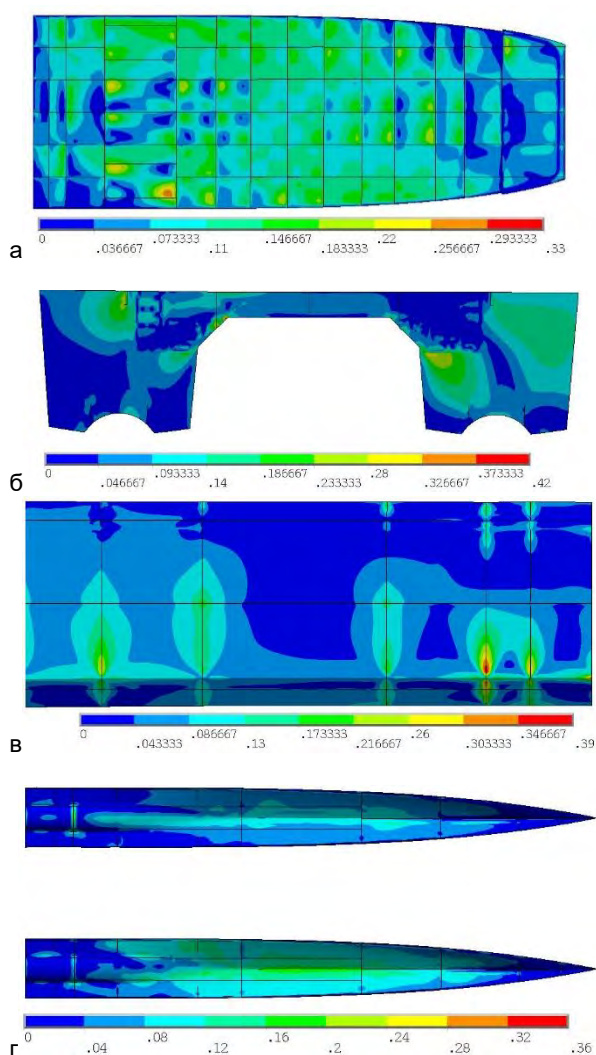


Рис. 4. Распределение критерия прочности в элементах конструкции корпуса при комбинированном нагружении 2: а) палуба, б) переборка (наиболее нагруженная), в) обшивка моста (фрагмент), г) обшивка днища

Представленные результаты свидетельствуют о том, что допустимые значения критерия максимальных напряжений даже в самом опасном случае нагружения не превышены. Таким образом, прочность конструкции корпуса катамарана при всех случаях нагружения обеспечена.

Результаты расчета всех расчётных случаев приведены в табл. 5.

Таблица 5
Расчитанные значения критерия прочности

Расч. случай	палуба	переборки	Обшивка днища	Обшивка моста
1	0.25	0.18	0.35	0.33
2	0.23	0.15	0.36	0.30
3	0.28	0.38	0.13	0.36
4	0.30	0.38	0.24	0.37
5	0.29	0.41	0.24	0.39
6	0.15	0.19	0.04	0.18

По результатам модификации прототипа катамарана разработана обновленная структура обшивки и палубы. Водоизмещение прототипа судна увеличилось с 89 до 93 т, главным образом, за счёт большей плотности стеклопластика. Данное увеличение является приемлемым для данного проекта.

Выполненные расчёты напряженно-деформированного состояния, подтверждают, что прочность всех элементов конструкции обеспечивается с необходимым запасом. Жесткость корпуса в целом, за счёт увеличения толщин корпусных конструкций, обеспечена на уровне исходной конфигурации корпуса.

Заключение

Выполненное исследование подтверждает возможность уменьшения стоимости композитного корпуса судна за счёт использования материала, стоимость которого значительно ниже. Установлено, что, за счёт замены армирующего наполнителя композиционного материала в палубе и обшивке с углеродных волокон на стекловолокна, стоимость материала корпуса в целом уменьшится в 1.5-2 раза по сравнению с исходным прототипом. Результаты исследования позволяют существенно снизить затраты на изготовление композитных корпусов кораблей и судов, что позволит расширить применение легких и надежных полимерных композиционных материалов в судостроении.

Литература

1. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композиционных материалов в судостроении // Современные наукоемкие технологии. 2013. №8. с. 116-117.
2. Францев М.Э. Проектное обоснование характеристик прочности судовых корпусных конструкций малого промышленного судна из композиционных материалов //Транспортные системы. 2018. №4(10). с. 29-36.
3. Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., Challis K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. Composite Structures. 2001. No. 53. p. 21-41.
4. Tawfik B.E., Leheta H., Elhewy A., Elsayed T. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. No. 9. p.185-198.
5. Kim D., Hennigan D., Beavers K. Effect of fabrication processes on mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites for 49 meter (160 foot) recreational yachts. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2010;No. 2(1). p. 45-56.
6. Ераносян К.С., Маслич Е.А., Федонюк Н.Н. Оптимизация конструкции корпуса корабля из полимерных композиционных материалов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Специальный выпуск № 2. с.124–130.
7. Mathijssen D. Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding. Reinforced Plastics. 2016. Vol. 60, No 5. p. 289-293.
8. Shivakumar K., Swaminathan G., Sharpe M. Carbon/Vinyl Ester Composites for Enhanced Performance in Marine Applications. Journal of reinforced plastics and. 2006. Vol. 25, No. 10. p.1101-1115.
9. Wollan E. Glass and carbon fiber reinforcement combine in hybrid long fiber thermoplastic composites to bridge price & performance gap. Reinforced Plastics. 2017. Vol. 61, No 1.. p.55-57.
10. <https://www.grantadesign.com/industry/products/granta-mi> . – URL:
11. Fu S.-Y., Lauke B., Mader E., Yue C.-Y., Hu X. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. Composites. 2000. Part A 31. p. 1117–1125.
12. Goh G.D., Dikshit V., Nagalingam A.P., Goh G.L., Agarwala S., Sing S.L., Wei J., Yeon. W.Y. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics . Materials and Design 2018. No. 137. p.79–89.
13. Seo C.-O., Jeong B., Kim J.-R., Song M., Noh J.-H., Lee J., Determining the influence of ship hull deformations caused by draught change on shaft alignment application using FE analysis . Ocean Engineering. 2020. No. 210. p.107488.
14. Zhiyong P., Zhongyuan M., Bo Z., Weiguo W.. Research on the bending efficiency of superstructure to hull girder strength of inland passenger ship. Ocean Engineering. 2010. No. 195 .106762.
15. Xu S., Liu B., Garbatov Y., Wu W., Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of ultimate strength of inland catamaran subjected to vertical bending moment . Ocean Engineering. 2019. No.188.106320.
16. Ojeda R., Prusty B. G., Salas M.. Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads. Ocean Engineering. 2004. No. 31. P. 901–929.
17. Tatsumi A., Fujikubo M.. Ultimate strength of container ships subjected to combined hogging moment and bottom local loads part 1: Nonlinear finite element analysis. Marine Structures. 2020. No. 69.102683.
18. Wang C., Wu J., Wang D. Numerical investigation of three-dimensional hull girder ultimate strength envelope for an ultra large container ship . Ocean Engineering. 2018. No 149. p.23–37.
19. Wang Q., Wang C., Wu J., Wang D.. Investigations on the torsional failure characteristics of the global hull girder with large deck openings. Ocean Engineering. 2010. No. 198. 107007.

20. Liu B., Wu W., Guedes Soares C.. Ultimate strength analysis of a SWATH ship subjected to transverse loads. *Marine Structures*. 2018. No. 57. p.105–120.
21. DNV-GL. Rules for classification. High speed and light craft. 2018. Pt. 3. Ch. 1. p. 33-41.
22. DNV. Classification notes - No. 30.8. Strength analysis of hull structures in high speed and light craft. 2012. p.12
23. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVI. Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов. НД № 2-020101-114. Санкт-Петербург. СПб.: PMPC. 2019. с. 75

References

1. Gumenyuk N.S., Grushin S.S. Primenenie kompozitsionnykh materialov v sudostroenii [Application of composite materials in shipbuilding]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. [Modern high technologies]. 2013. №8. p. 116-117.
2. Frantsev M.E. Proektnoe obosnovanie kharakteristik prochnosti sudovykh korpusnykh konstruksiy malogo promyslovogo sudna iz kompozitsionnykh materialov [Design substantiation of strength characteristics of ship hull structures of a small composite fishing vessel]. *Transportnye sistemy* [Transport systems]. 2018. №4(10). p. 29-36.
3. Mouritz A.P., Gellert E., Burchill P., Challis K. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*. 2001. No. 53. p. 21-41.
4. Tawfik B.E., Leheta H., Elhewy A., Elsayed T. Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2017. No. 9. p.185-198.
5. Kim D., Hennigan D., Beavers K. Effect of fabrication processes on mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites for 49 meter (160 foot) recreational yachts. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010;No. 2(1). p. 45-56.
6. Eranosyan K.S., Maslich E.A., Fedonyuk N.N. Optimizatsiya konstruksii korpusa korablya iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Design optimization of the ship hull made of polymer composite materials]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov state research centre], 2018. №2: 124–130.
7. Mathijsen D. Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding. *Reinforced Plastics*. 2016. Vol. 60, No 5. p. 289-293.
8. Shivakumar K., Swaminathan G., Sharpe M. Carbon/Vinyl Ester Composites for Enhanced Performance in Marine Applications. *Journal of reinforced plastics and*. 2006. Vol. 25, No. 10. p.1101-1115.
9. Wollan E. Glass and carbon fiber reinforcement combine in hybrid long fiber thermoplastic composites to bridge price & performance gap. *Reinforced Plastics*. 2017. Vol. 61, No 1.. p.55-57.
<https://www.grantadesign.com/industry/products/granta-mi> . – URL:
11. Fu S.-Y., Lauke B., Mader E., Yue C.-Y., Hu X. Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites*. 2000. Part A 31. p. 1117–1125.
12. Goh G.D., Dikshit V., Nagalingam A.P., Goh G.L., Agarwala S., Sing S.L., Wei J., Yeon. W.Y. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Materials and Design* 2018. No. 137. p.79–89.
13. Seo C.-O., Jeong B., Kim J.-R., Song M., Noh J.-H., Lee J., Determining the influence of ship hull deformations caused by draught change on shaft alignment application using FE analysis. *Ocean Engineering*. 2020. No. 210. p.107488.
14. Zhiyong P., Zhongyuan M., Bo Z., Weiguo W.. Research on the bending efficiency of superstructure to hull girder strength of inland passenger ship. *Ocean Engineering*. 2010. No. 195 .106762.
15. Xu S., Liu B., Garbatov Y., Wu W., Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of ultimate strength of inland catamaran subjected to vertical bending moment. *Ocean Engineering*. 2019. No.188.106320.
16. Ojeda R., Prusty B. G., Salas M.. Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads. *Ocean Engineering*. 2004. No. 31. P. 901–929.
17. Tatsumi A., Fujikubo M.. Ultimate strength of container ships subjected to combined hogging moment and bottom local loads part 1: Nonlinear finite element analysis. *Marine Structures*. 2020. No. 69.102683.
18. Wang C., Wu J., Wang D. Numerical investigation of three-dimensional hull girder ultimate strength envelope for an ultra large container ship. *Ocean Engineering*. 2018. No 149. p.23–37.
19. Wang Q., Wang C., Wu J., Wang D.. Investigations on the torsional failure characteristics of the global hull girder with large deck openings. *Ocean Engineering*. 2010. No. 198. 107007.
20. Liu B., Wu W., Guedes Soares C.. Ultimate strength analysis of a SWATH ship subjected to transverse loads. *Marine Structures*. 2018. No. 57. p.105–120.
21. DNV-GL. Rules for classification. High speed and light craft. 2018. Pt. 3. Ch. 1. p. 33-41.
22. DNV. Classification notes - No. 30.8. Strength analysis of hull structures in high speed and light craft. 2012. p.12
23. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XVI. Structure and Strength of Fiber-Reinforced Plastic Ships. ND № 2-020101-114. Saint Petersburg. 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Викторович Ховайко; ведущий инженер УНИЛ «Вычислительная механика», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

Анна Олеговна Осипова, студентка магистратуры института передовых производственных технологий, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: osipova.an96@mail.ru

Александр Сергеевич Немов, кандидат технических наук., доцент высшей школы «Механика и процессы управления», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: nemov_as@spbstu.ru

Mikhail V. Khovaiko, lead engineer of educational scientific-research laboratory "Computational Mechanics", Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: hovajko_mv@spbstu.ru

Anna O. Osipova, master student of institute of advanced manufacturing technologies, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: osipova.an96@mail.ru

Alexander S. Nemov, Ph.D., associate professor at «Mechanics and Control» department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: nemov_as@spbstu.ru

УДК 629.12.

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.006

Анализ запаса остойчивости судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания

Е.П. Роннов¹, Ю.А. Кочнев¹, И.А. Гуляев²¹Волжский государственный университет водного транспорта, ²ФАУ «Российский Речной Регистр»

Аннотация При проверке остойчивости по основному критерию или критерию погоды, кренящий и восстанавливающий момент могут быть равны между собой. С одной стороны этого достаточно, чтобы судно было признано остойчивым при действии динамического ветра, с другой стороны, минимальные отклонения различных элементов и характеристик судна от расчётных значений, могут вызвать рост кренящего и снижение восстанавливающего моментов, который при низком уровне самой остойчивости судна может привести к чрезвычайной ситуации, и в худшем случае потере судна. В настоящей работе представлен общий подход к определению фактически необходимого коэффициента запаса остойчивости, проанализированы факторы влияющие на изменение действующих на судно моментов при его наклонении на конечные углы. Авторами так же рассмотрены минимальные приращения данных факторов, которые допускаются действующими Правилами Российского Речного Регистра и фактически приводят, к незначительной ошибке. В качестве примера рассчитан фактический коэффициент запаса остойчивости, для сухогрузного судна смешанного (река-море) плавания.

Ключевые слова: остойчивость, коэффициент запаса остойчивости, судно смешанного (река-море) плавания, приращение водоизмещения, приращение координат центра величины

Analysis of the ship's stability reserve for inland and mixed (river-sea) navigation

Evgeny P. Ronnov¹, Yury A. Kochnev¹, Ilya A. Gulyaev²¹Volga State University of Water Transport, ²Federal Autonomous Institution Russian River Register

Abstract When checking the stability of the main criterion or the weather criterion, the heeling and restoring moment can be equal to each other. On the one hand, this is sufficient for the ship to be considered stable under the influence of dynamic wind, on the other hand, the minimum deviations of various elements and characteristics of the vessel from the calculated values can cause an increase in the heeling and reducing the restoring moments, which, if the ship's stability is low, can lead to an emergency situation, and in the worst case, the loss of the vessel. This paper presents a General approach to determining the actual required coefficient of stability margin, and analyzes the factors that affect the change in the moments acting on the ship when it tilts to the final angles. The authors also consider the minimum increments of these factors, which are confirmed by the current Rules of the Russian River Register and actually lead to a minor error. As an example, the actual coefficient of responsiveness is calculated for a dry cargo ship of mixed (river-sea) navigation.

Key words: stability, coefficient of stability margin, vessel of mixed (river-sea) navigation, increment of displacement, increment of coordinates of the center of magnitude

Введение

Одним из численных показателей безопасности судна можно считать наличие на необходимом уровне мореходных качеств, таких как плавучесть, остойчивость, прочность и других, обеспечивающих безопасность плавания. Современные методики, позволяющие оценить уровень этих качеств, дают вполне приемлемый результат. Однако при расчётах предусматривается некоторый запас нормируемого качества, учитывающий факторы, неподдающиеся формализации. Так, например, при расчёте прочности полученные напряжения сравниваются с допускаемыми, которые меньше предела текучести материала корпуса. Соотношение допустимого значения с расчётным характеризуется, так называемым коэффициентом запаса.

Определение запаса остойчивости

При нормировании остойчивости, например, по Правилам [2] она считается достаточной, если выполняется условие

$$M_{кр} \leq M_{дон}$$

или

$$k = \frac{M_{дон}}{M_{кр}} \geq 1, \quad (1)$$

где $M_{кр}$ – кренящий момент, от соответствующей внешней силы, вызывающей наклонение судна;

$M_{дон}$ – предельно допускаемый момент, равный моменту кренящему судно до допустимого угла крена при динамическом наклонении является как бы передаточной функцией кренящего момента [1].

Из выражения (1) следует, что остойчивость считается достаточной даже если коэффициент запаса K будет равен единице. То есть в этом случае запас остойчивости отсутствует и следует полагать, что выполненный расчёт остойчивости учитывает все обстоятельства и факторы, объективного и субъективного характера, которые могут иметь место при реальном штормовании судна.

Но в процессе эксплуатации судна возможны некоторые отклонения от базовых (проверочных) параметров судна, связанных с неточностью расчёта водоизмещения D , центра тяжести Z_g , площади парусности, погрешности в оценки внешнего воздействия, ошибок судоводителя и т.п. Для судов, остойчивость которых заведомо является

избыточной, например, для грузовых внутреннего и смешанного (река-море) плавания, учёт подобных отклонений не является актуальным. В тоже время для пассажирских судов, толкачей и некоторых других типов, характеризующихся большой площадью парусности, большими значениями аппликаты центра парусности и тяжести отсутствие запаса остойчивости может привести к аварийным ситуациям.

Не затрагивая причины, имеющие вероятностный характер, например, превышение в рейсе силы ветра над нормируемым значением, человеческий фактор при выполнении манёвров в условия шторма и т.п., вначале покажем влияние возможных отклонений конструктивных величин на оценку остойчивости по основному критерию, то есть при действии динамического ветра.

За допускаемый момент, примем момент кренящий судно на угол опрокидывания, численно равный восстанавливающему моменту при этом угле наклона. Угол заливания в данном случае не будем принимать во внимание, так как его можно на судне обеспечить практически любой величины, необходимым образом оборудуя лазы, люки, двери, иллюминаторы и другие отверстия. Величина динамического восстанавливающего момента зависит от площади под диаграммой плеч статической остойчивости до рассматриваемого угла наклона, а само плечо в свою очередь в общем случае является функцией следующих величин

$$l = f(D, Z_g, \theta_m, \Delta l),$$

где $\theta_m = f_1(B/T, \delta, \sqrt{h_0}/B)$ – амплитуда бортовой качки;

Δl – поправка на грузы, перемещаемые при наклонении, сопутствующий дифференциал и т.д.

Выше было сказано, что водоизмещение и аппликата центра тяжести, определяемые с возможной точностью, могут для реального судна иметь отклонение от расчётных значений, как в большую, так и в меньшую сторону. К тому же от величины D и следовательно осадки зависят практически все элементы плавучести и остойчивости.

Крупные пассажирские и грузовые суда внутреннего и смешанного (река-море) плавания имеют вертикальные борты, и, следовательно, их ширина не зависит от осадки судна. Для судов, у которых имеется развал борта ширину так же можно представить функцией от водоизмещения. Изменением длины, вследствие незначительного учёта в расчётных формулах Регистра, на наш взгляд можно пренебречь, и считать, что она постоянна.

Грузами, которые могут перемещаться при наклонении, как известно из [1] может быть сыпучий, подвешенный, жидкий. Для сухогрузного судна наибольшую опасность с точки зрения влияния на коэффициент запаса остойчивости может оказывать суммарное воздействие находящийся в отдельных небольших цистернах жидкий груз общесудовых и специальных системах, так как в соответствии с [2] его влияние допускается не учитывать при выполнении условия:

$$\frac{vbyk\sqrt{\delta_1}}{D_{nop}} \leq 0,01 \quad (2)$$

где v – полный объём цистерны, м³;

b – максимальная ширина цистерны, м;

γ – удельный вес жидкости, кН/м³;

$\delta_1 = v/l_ybh$ – коэффициент полноты цистерны;

D_{nop} – водоизмещение порожнем, кН;

l_y – длина цистерны, м;

k – коэффициент, зависящий от соотношения ширины к высоте цистерны h .

Чтобы показать фактический уровень остойчивости судна, необходимо учесть все цистерны и отсеки с жидким грузом в независимости от выполнения условия (2). Поправка на их влияние зависит от геометрических характеристик самой цистерны и от характеристик жидкости, находящейся в данной цистерне [1].

Для целей настоящей работы предположим, что на судне имеется группа цистерн, которые в соответствии с Правилами [2] могут быть не учтены при расчёте и построении диаграммы остойчивости. Однако их влияние можно предусматривать, условно приводя к суммарному влиянию одной цистерны с предельными размерами для выполнения неравенства (2). Примем, что коэффициент полноты такой цистерны равен 1; удельный вес жидкости 9,81 кН/м³, как оказывающий наибольшее влияние; коэффициент $k = 0,11$; максимальную ширину цистерны – ширине судна; высоту цистерны – из условия соответствия коэффициенту k , $h = B/3$. Тогда длина такой условной цистерны составит

$$l_y = 0,0278 \frac{D_{nop}}{B^3}.$$

Сопутствующий дифференциал на судне может возникнуть вследствие погрешностей в определении абсциссы центра тяжести, которые приведут к корректировке диаграммы остойчивости, и, следовательно, восстанавливающего момента. Изменение дифференциала вызовет корректировку момента инерции начальной ватерлинии судна, которая может привести к изменению момента как в большую, так и в меньшую сторону.

Таким образом, окончательно допустимый момент можно рассматривать зависимым от четырёх параметров

$$M_{дон} = f_0(D, Z_g, X_g, \Delta l). \quad (3)$$

За кренящий момент в соответствии с Правилами [2] принимается момент в зависимости от действующего на судно динамически приложенного давления ветра, p , и площади парусности S , который находят по формуле

$$M_{кр} = 0,001pSz,$$

где z – приведённое плечо кренящей пары

$$z = z_T + a_1 a_2 T, \\ z_T = z_n - T,$$

a_1, a_2 – поправочные коэффициенты, определяемые для рассматриваемого судна в зависимости от аппликаты центра тяжести и действующей осадки судна, и, следовательно опять же от водоизмещения;

z_T – возвышения центра парусности над плоскостью действующей ватерлинии;

$$z_n = j_1(T) - \text{аппликата центра парусности.}$$

Таким образом, для рассматриваемого случая приведённое плечо кренящей пары определяется осадкой, то есть действующим водоизмещением и положением центра тяжести судна по высоте

$$z = j_2(D, Z_g).$$

Площадь парусности S зависит от осадки данного судна, и, следовательно, от его водоизмещения, при чем с уменьшением последнего она будет увеличиваться

$$S = j_3(D).$$

Условное расчётное давление ветра p в соответствии с [2] зависит от класса судна, возвышения центра парусности над плоскостью действующей ватерлинии z_T . Поскольку z_T анализируемого судна зависит от осадки, то в конечном счёте, так же от водоизмещения

$$p = j_4(D).$$

Окончательно кренящий момент в общем виде можно записать как функцию от аппликаты центра тяжести и водоизмещения

$$M_{кр} = f_k(D, Z_g). \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент запаса остойчивости можно представить в виде

$$k = \frac{f_\partial(D, Z_g, \Delta l, X_g)}{f_k(D, Z_g)} = w(D, Z_g, \Delta l, X_g) \geq 1, \quad (5)$$

где $w(D, Z_g, \Delta l, X_g)$ – некоторая результирующая функции

В процессе постройки и эксплуатации возможны некоторые отклонения параметров функции w вызванные допустимой неточностью расчётов, изменениями нагрузки во время рейса. То есть. реальный коэффициент запаса остойчивости судна должен быть

$$K \geq 1 + \Delta w \\ \text{или} \\ K \geq 1 + dw, \quad (6)$$

где dw – полный дифференциал коэффициента запаса остойчивости, равный в общем виде

$$dw = \frac{\partial w(D, Z_g, \Delta l, X_g)}{\partial D} dD + \frac{\partial w(D, Z_g, \Delta l, \psi)}{\partial Z_g} dZ_g + \\ + \frac{\partial w(D, Z_g, \Delta l, X_g)}{\partial \Delta l} d\Delta l + \frac{\partial w(D, Z_g, \Delta l, X_g)}{\partial X_g} dX_g, \quad (7)$$

где dD, dZ_g, dX_g – приращения водоизмещения, аппликаты ординаты центра тяжести судна;

$d\Delta l$ – поправка на влияние предельной не учитываемой цистерны при проверке остойчивости.

Или, учитывая не возможность представить допускаяемый и кренящий момент в чисто аналитической форме, и необходимость определения их частных производных численными методами, коэффициент запаса остойчивости можно записать

$$K = \frac{w(D \pm dD, Z_g + dZ_g, \Delta l, X_g \pm dX_g)}{w(D, Z_g, X_g)}. \quad (8)$$

В соответствии с действующими нормами [2] на величины приращений в (8) могут влиять:

- допущение не проводить опыт кренования при изменении водоизмещения порожнем менее чем на 2% ($dD_1 = \pm 0,02 D_{nop}$), возвышение центра тяжести менее 4 см ($dZ_{g1} = +0,04 D_{nop} / D$), абсциссы центра тяжести, менее 1% от длины судна ($dX_g = \pm 0,01 L D_{nop} / D$).

- допущение о перераспределении 5% грузоподъёмности судна из центральных трюмов в оконечности, которое, предполагая, что размеры трюма в плане составляют половину длины (L) и ширины судна, можно представить

$$dZ_{g2} = + \frac{0,02 P \times \mu}{LB},$$

где μ – удельный погрузочный объём груза;

P – грузоподъёмность судна.

- точности проведения опыта кренования, в области измерения осадки 0,01 м, что для грузовых судов составит $dD_2 = \pm 0,01 \rho g \alpha LB$, где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, α – коэффициент полноты ватерлинии.

Окончательные приращения, учитывая возможность одновременного наличия погрешностей

$$dD = dD_1 + dD_2 = \pm (0,01 \rho g \alpha LB + 0,02 D_{nop}) \\ dZ_g = dZ_{g1} + dZ_{g2} = 0,04 \frac{D_{nop}}{D} + \frac{0,02 P \times \mu}{LB} \\ dX_g = \pm 0,01 L \frac{D_{nop}}{D}. \quad (9)$$

Следует отметить, что изменение аппликаты центра тяжести судна отрицательно на остойчивость будет сказываться только при её увеличении, в то время как приращение водоизмещения и абсциссы центра тяжести могут иметь любой знак. Аналогично наличие свободной поверхности жидкого груза будет иметь отрицательный эффект на остойчивость и её учет обязателен. Для определения фактического уровня остойчивости судна необходимо проверить её в следующих случаях:

- положительные приращение водоизмещения и абсциссы центра тяжести;
- отрицательные приращение водоизмещения и абсциссы центра тяжести;
- разнознаковые приращение водоизмещения и абсциссы центра тяжести (два случая).

В качестве примера рассмотрим

- сухогрузный теплоход класса «М-СП», проекта 781 [3], имеющего следующие характеристики: длина 92,0 м, ширина 13,0 м, высота борта 5,5 м, осадка 3,27, грузоподъёмность 2000 т, водоизмещение порожнем 1000 т, водоизмещение в грузу 3121 т, коэффициент полноты ватерлинии 0,865, аппликата центра тяжести 3,62 м, абсцисса центра тяжести судна -0,84 м, коэффициент общей полноты 0,78. Рассматриваемые приращения будут равны $dD = \pm 30,6$ т, $dZ_g = 0,07$ м, $dX_g = \pm 0,3$ м, а размер цистерны с жидким грузом ширина 13,0 м, высота 4,3 м, длина 0,124 м.

- пассажирский теплоход класса «О» проекта 730 [3], имеющего следующие характеристики: длина 40,6 м, ширина 6,0 м, высота борта 2,5 м, осадка 1,46, пассажироместность 242 чел, водоизмещение порожнем 153,6 т, водоизмещение в грузу 180 т, коэффициент полноты ватерлинии 0,77, аппликата центра тяжести 2,68 м, абсцисса центра тяжести судна 0,08 м, коэффициент общей полноты 0,5. Рассматриваемые приращения будут равны $dD = \pm 5,0$ т, $dZ_g = 0,034$ м, $dX_g = \pm 0,346$ м, а размер

цистерны с жидким грузом ширина 6,0 м, высота 2,0 м, длина 0,194 м.

Расчёт кренящего момента и амплитуды бортовой качки выполнены по методике [2], посадка судна, действующие значения элементов плавучести и начальной остойчивости, диаграмма плеч статического и динамического восстанавливающего момента с учётом свободной поверхности жидких грузов в условной цистерне в программе SeaHydro, плечо допустимого момента по углу опрокидывания определено по диаграмме плеч динамической остойчивости, по методике [2] (рисунок 1). Результаты расчётов без приращений и с приращением приведены в таблице 1.

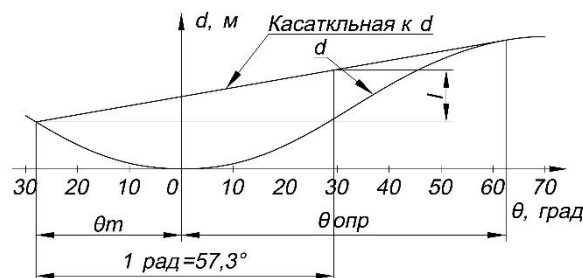


Рис. 1 – Определение плеча допустимого момента

Анализируя таблицу 1 можно сделать вывод, что для судна проекта 781 отличие расчетного коэффициента запаса остойчивости при допустимых Правилами [2] отклонениях отличается от возможного на 6,7%. Можно предположить, что и у других грузовых судов смешанного (река-море) плавания будет наблюдаться отклонения подобного порядка. При высокой избыточной остойчивости с одной стороны данные отклонение, действительно, можно не учитывать, с другой стороны, проведённый расчёт показал, что действующий норматив для коэффициента запаса в величину равную единице, явно недостаточен.

Таблица 1

Сопоставительные расчёты для сухогрузного судна

Величина	Сухогрузное судно					Пассажирское судно				
	Варианты нагрузки					Варианты нагрузки				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
dD	0	+30,6	+30,6	-30,6	-30,6	0	+5,0	+5,0	-5,0	-5,0
dZ_g	0	+0,07	+0,07	+0,07	+0,07	0	+0,034	+0,034	+0,034	+0,034
dX_g	0	+0,3	-0,3	-0,3	+0,3	0	+0,346	-0,346	-0,346	+0,346
Водоизмещение	3121	3151,6	3151,6	3090,4	3090,4	180	185	185	175	175
Абсцисса ЦТ	-0,84	0,08	-1,76	-1,76	0,08	0,08	0,426	-0,266	-0,266	0,426
Аппликата ЦТ	3,62	3,72	3,72	3,72	3,72	2,68	2,714	2,714	2,714	2,714
Угол качки, град	28,129	27,786	27,837	28,075	28,015	18,296	17,48	17,54	18,241	18,08
Момент кренящий, кНм	298,4	288,395	290,03	286,59	295,03	96,46	95,036	95,42	97,92	97,53
Плечо допустимого момента, м	0,337	0,306	0,305	0,318	0,316	0,065	0,055	0,057	0,062	0,061
Момент допустимый, кН	10331,9	9461,8	9438,0	9628,6	9572,8	114,1	100,3	102,8	106,0	104,6
Коэффициент запаса остойчивости (КЗО)	34,627	32,809	32,542	32,465	32,447	1,183	1,056	1,077	1,083	1,072
Отклонение КЗО	-	1,055	1,057	1,067	1,067	-	1,12	1,098	1,092	1,104

Результаты по пассажирскому судну проекта 730 (таблица 2) ожидаемо показывают большее относительное отклонение коэффициента запаса остойчивости до 12%, однако судно ещё сохраняет положительную остойчивость. Если же учесть возможные ошибки судоводителя, в виде

совершения неверного манёвра, например, маловероятной циркуляции в штормовых условиях, то в варианте нагрузке «1», дающем наибольшее отклонение, дополнительный момент на циркуляции составляет 17 кНм [1], с учетом потери скорости на волнении. Следовательно общий кренящий момент:

циркуляция и динамически приложенным ветер, будет равен 112 кНм, при допустимом моменте всего 100 кНм. Отсюда следует, что остойчивость явно будет недостаточной.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены отклонения, величин, которые допускаются Правилами [2]. Однако в процессе эксплуатации приращения могут быть вызваны и другими факторами [4]: расходование запасов в течение рейса, наличием

статического начального крена, отклонением скорости ветра на акватории от принятых нормативных значений, и, следовательно, иным значением его динамического давления, а так же рядом других случайных факторов. Поэтому считаем необходимым проведение подробного анализа возможных критических отклонений «опасных» величин, обоснования значения коэффициента запаса остойчивости судна и учёт его при проверке остойчивости в соответствии с Правилами [2].

Литература

1. Справочник по теории корабля: В трёх томах. Том 2. Статика судов. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с..
2. Российский Речной Регистр. Правила классификации и постройки судов. Часть II Остойчивость. Непотопляемость. Надводный борт. Манёвренность. М. 2019, режим доступа <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rulesrrr2019.pdf>
3. Справочник по серийным транспортным судам. В 11 томах. Т2. / М-во реч. флота РСФСР, Техн. упр., ЦБНТИ и пропаганды. - Москва : Транспорт, 1972.
4. Гуральник Б.С. Оценка погрешностей контроля плавучести и остойчивости расчётным путём / Б.С. Гуральник, А.К. Сирота, И.В. Якута // труды региональной научно-практической конференции «Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений». Севастополь, 29-30 ноября 2018 г. – 82-88 с

References

1. Spravochnik po teorii korablya [Handbook of ship theory]: V tryoh tomah. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov / pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 440 s.
2. Rossiyskiy Rechnoy Registr. Pravila klassifikatsii i postroyki sudov. Chast' II Ostoychivost'. Nepo-toplyaemost'. Nadvodnyy bort. Manevrennost' [Russian river register. Rules for classification and construction of ships . Part II Sustainability. Unsinkability. Freeboard. Maneuverability]. M. 2019, rezhim dostupa <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rulesrrr2019.pdf>
3. Spravochnik po seriynym transportnym sudam [Handbook of serial transport vessels]. V 8 tomakh. T2., M-vo rech. flota RSFSR, Tekhn. upr., TsBNTI i propagandy. - Moskva: Transport, 1972.
4. Gural'nik B.S. Ocenka pogreshnostej kontrolya plavuchesti i ostojchivosti raschyotnym putyom [Estimation of errors in buoyancy and stability control by calculation] / B.S. Gu-ral'nik, A.K. Sirota, I.V. YAkuta // trudy regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye vo-prosy proektirovaniya, postrojki i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzhenij». Sevastopol', 29-30 noyabrya 2018 g. – 82-88 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Павлович Роннов, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Evgeniy P. Ronnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Юрий Александрович Кочнев, кандидат технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Yuri A. Kochnev, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, ptps@vgavt-nn.ru

Илья Александрович Гуляев, начальник корпусного отдела ФАУ «Российский Речной Регистр», Окружной проезд, 15, корп. 2, Москва, 105187, e-mail: guliaev@rivreg.ru

Ilya A. Gulyaev, Head of Hull Department, Federal Autonomous Institution Russian River Register, bld. 2, 15, Okruzhnoy proezd, Moscow, Russia, 105187

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 629.12.002

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.007

Анализ автоматизации технологических процессов при изготовлении судовых конструкций.

Е.Г. Лебедева¹, А.А. Сомпольцева¹

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, филиал САФУ в г. Северодвинске

Аннотация. В работе обосновывается положение о том, что ход принятия решений при разработке технологических процессов изготовления судовых конструкций может быть автоматизирован за счет использования информационной модели судовой конструкции. Для создания автоматизированного подхода процесса принятия решений при разработке технологических процессов проведен анализ процесса принятия решений, разработан единый алгоритм процесса и построена принципиальная схема разработки технологического процесса изготовления корпусной конструкции. Проанализирована взаимосвязь различных факторов, таких как: цели разработки данного техпроцесса, параметры техпроцесса, варианты технологического решения и виды технологических операций. Проведен пример выбора технологического процесса в конкретном случае при резке корпусных деталей различными способами и определен способ, соответствующий поставленным целям. В статье предложена концепция информационной модели судовой корпусной конструкции, которая предполагает применение 3D модели конструкции и набор баз данных, включающих стандартный набор элементов корпуса судна, технологические данные, нормативно-техническую и справочную документацию, технологические операции.

Ключевые слова: Информационная модель, судовая конструкция, автоматизация технологических процессов, анализ разработки технологических процессов создания судовых конструкций, принятие решений.

The analysis of process flow automation during manufacture of ship structures.

Elena G. Lebedeva¹, Anna A. Sompoltseva¹

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a branch of NArFU in Severodvinsk

Abstract. The paper substantiates the statement that decision-making process during development of process flow for manufacture of ship structures can be automated using an information model of a ship structure. In order to create an automated approach to the decision-making process during development of process flow, an analysis of the decision-making process has been carried out, a unified process algorithm has been developed and a flow diagram for development of a process flow for manufacturing a hull structure has been built. The interrelation of various factors has been analyzed, such as: goals for development of the given process flow, parameters of the process flow, options for the process solution and types of process operations. An example has been given of selecting a process flow in a specific case when cutting hull parts using various ways, and a method has been determined that corresponds to the goals set. The article proposes the concept of an information model of a ship's hull structure, which involves the use of a 3D model of the structure and a set of databases, including a standard framing of hull stiffening members, process data, regulatory and reference documentation, process operations.

Key words: Information model, ship structure, automation of process flow, analysis of process flow development for creating ship structures, decision making.

Введение

Опираясь на опыт лидеров современного судостроения, очевидно, что повышение эффективности судостроительного производства можно достичь при использовании разумного уровня автоматизации. Современные идеи и разработки в этой области могут повысить эффективность и качество судостроения.

Развитие автоматизации происходит одновременно с автоматизацией процесса управления и производства. Автоматизация судостроительного производства повышается за счет создания автоматизированных линий и автоматизированных машин, а автоматизация управления – путем создания автоматизированных управленческих комплексов на всех этапах производства [1].

Несмотря на консервативность отрасли, при автоматизации судостроительного производства приходится опираться на уже существующие

технологии, и одновременно внедрять новейшие технологии. Поэтому, автоматизация производства, в основном, происходит за счет внедрения новой техники и оптимизации уже имеющихся технологий [2].

Основой автоматизации судостроительного производства являются технологические процессы, обеспечивающие высокий уровень производительности, надежности, качества и эффективности изготовления корпусных конструкций. Проектирование технологических процессов – это процесс последовательного принятия решений при создании объекта, допускающего многовариантность процессов. Индивидуальное решение каждой задачи касается в основном задач расчетного характера. Остальные группы задач зачастую имеют типовые решения с учетом заранее известных производственных условий. Таким образом, технологическое проектирование позволяет принимать формализованные решения. Для принятия

формализованных решений, достаточно описать весь набор имеющихся решений и условия их принятия. Весь процесс выбора условий сводится к сопоставлению исходных данных с критериями применимости имеющихся технологических решений. Большая группа задач, к которым относятся: производство нетиповой производственной оснастки, необходимость применения нетипового оборудования, последовательность применения отдельных технологических операций и другое, в основном, представлена именно нерасчетными задачами [3]. Задачи подобного характера могут решаться за счет применения на всех этапах судостроительного производства информационной модели изделия. Интегрированная информационная модель является основой для построения автоматизированной системы управления технологическими процессами, в том числе обработки конструкций на технологичность. На базе модели решаются задачи анализа эффективности различных технологий и обеспечения выпуска высококачественной продукции. Информационная модель объекта морской техники на сегодняшний момент уже обеспечивает обмен данными между проектировщиком и предприятием – судостроителем, служит главным источником информации при формировании закупок материалов, планирования работ, определения срока постройки судна, для разработки технологических процессов изготовления отдельных элементов и самого технического объекта.

Информационная модель любого технического изделия представляет собой множество взаимосвязанных понятий в совокупности с параметрами и значениями, определяющими свойства элементов, которые заданы в виде множеств. Частная информационная модель создается для формирования множества понятий, отображающих параметры, понятия и свойства объекта, взаимосвязанные между собой, необходимые для решения поставленной задачи.

Описание процесса разработки технологического процесса

Для описания принципа решения нерасчетных задач технологического типа, необходимо составить набор всех имеющихся представленных решений и определить преследуемые цели. Например, на данном предприятии деталь конструкции можно произвести двумя различными способами, тогда множество представленных решений (1), будет иметь вид [4]:

$$Q=\{q_1, q_2\} \quad (1)$$

Если имеется количество k различных способов (2), то

$$Q=\{q_1, q_2, \dots, q_{k-1}, q_k\} \quad (2)$$

где $q_1 \dots q_k$ – способы представленных решений, Q – множество представленных k решений.

Обычно разработка технологического процесса изготовления корпусных конструкций осуществляется технологом на основе информации, представленной на чертежах, [5], согласно требованиям справочной и нормативно-технической документации и базируется на примере типовых процессов. При разработке технологического процесса новейших образцов морской техники и их

конструкций, создание технологического процесса полностью зависит от мастерства технолога и его опыта, и становится очень трудоемким и длительным процессом.

В случае слабо развитой автоматизации конструкторско-технологической подготовки судостроительного производства, технологические процессы разрабатываются непосредственно в виде комплектов технологической документации. Повышая уровень автоматизации в сфере конструкторско-технологической подготовки судостроительного производства, описание технологических процессов можно напрямую разместить в электронной базе данных, при этом технологическая документация становится лишь отображением внутреннего представления техпроцессов во внешней сфере. Данные, имеющиеся в базе технологического процесса, – это основной источник информации для принятия решения в области задач автоматизированного управления конструкторско-технологической подготовкой судостроительного производства [6].

Основным принципом разработки технологического процесса, после проверки конструкции на технологичность, является назначение технологических операций, при определении производственных условий: места проведения технологической операции, выбора оборудования, оснастки, материалов, инструмента, исполнителей и т.д., что определяется опытом технолога и нормативной документацией.

Таким образом, выбор оптимальной операции является сложной, многофакторной и вариативной задачей и зависит от конструктивных элементов корпусной судовой конструкции, точности изготовления, от способа и условий размещения деталей конструкции, описания маршрута изготовления корпусной конструкции и т.д. Построение маршрута является зависимым от конструктивного решения корпусной конструкции и определяется многими показателями, например, ее массагабаритными характеристиками, принятой схемы строповки и перемещения; техническими условиями на изготовление деталей конструкции (допуски и посадки, взаимное расположение конструктивных элементов, способов сборки и сварки, что также зависит от вида применяемого металла (толстолистовой или тонколистовой прокат)); оборудования и оснастки, типа и назначения изделия (под гидравлические испытания или нет); серийности и т.д.

Исходными данными для разработки технологического процесса изготовления конструкции корпуса являются ее 3D модель. Процесс проектирования технологических процессов при изготовлении судовых конструкций в электронном виде можно отнести к распознаванию данного объекта во множестве других объектов. Данный технологический процесс создается для удовлетворения определенных целей. Обычно основной целью технологического процесса является изготовление качественной продукции при наименьшей стоимости. Процесс определения объекта происходит в окружении многих внутренних и внешних факторов, оказывающих влияние на формирование данного техпроцесса. Основными влияющими на процесс создания техпроцесса

факторами являются: цели разработки данного техпроцесса, параметры техпроцесса, варианты технологического решения и виды технологических операций [4]. Каждое из которых, можно представить в виде множества:

W – множество всех целей разработки техпроцесса (3). Всего i целей.

$$W = \{w_1, \dots, w_i\} \quad (3)$$

R – множество всех параметров техпроцесса (4). Всего s параметров.

$$R = \{r_1, \dots, r_s\} \quad (4)$$

P – множество всех вариантов технологических операций (5). Всего j вариантов.

$$P = \{p_1, \dots, p_j\} \quad (5)$$

G – множество всех вариантов технологического решения (6). Всего k вариантов.

$$G = \{g_1, \dots, g_k\} \quad (6)$$

При создании техпроцесса эти множества взаимосвязаны. То есть, в общем виде множество всех влияющих на процесс принятия решений при создании технологических процессов G можно представить в виде массива данных, зависящих от всех факторов множеств: W, R и G. Выбор рационального варианта технологического решения Q определяется множеством из k вариантов. Поэтому все цели, параметры и варианты технологического процесса по изготовлению корпусной конструкции взаимосвязаны между собой и соответствуют друг другу. Например, из множества всех целей W выбрано какое-то w, то этой цели соответствует значение определенных параметров множества R, определенный вариант совокупности технологических операций из множества P и выбирается конкретное решение данного технологического процесса g. Варьируя и перебирая значения множеств, можно получить оптимальный с точки зрения рациональности вариант технологического решения, который будет отвечать поставленным целям разработки техпроцесса.

Таким образом, выбор оптимального решения связан с определением некоторого подмножества g из множества G, на основе требований к изготавливаемому объекту, определяемых внешними и внутренними факторами. Внутренние факторы: толщина металла, массовые и габаритные характеристики конструкции и др. Внешние факторы могут задавать: способ сборки и особенности сварки, допуски при раскрое металла, последовательность сборки, способ подачи деталей и т.д.

То есть, на информационном уровне электронная модель корпусной конструкции представляет собой массив данных (7), в котором каждый элемент массива r_{nm} представляет собой определенные параметры [7]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Действия технолога представляют собой назначение дополнительных логических функций на изготовление деталей, основанные на имеющемся опыте и применении нормативно-технической и справочной документации (8):

$$D = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ \dots \ d_j] \quad (8)$$

Следовательно, совокупность всех технологических операций в техпроцессе можно представить в виде множеств P и Pp, определяемого весь технологический процесс, где P является

результатом пересечения R и D и представляет собой основные технологические операции (всего j операций) (9):

$$P = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ \dots \ p_j] \quad (9)$$

В множестве P могут задаваться различные виды технологических операций, например, резка металла: газорезка или гидроабразивная резка; сварка металла: в среде защитных газов или без и т.д.

А множество Pp – дополнительные технологические операции (10), зависящие от выбора основной технологической операции множества P:

$$Pp = \begin{bmatrix} Pp_{11} & Pp_{12} & \dots & Pp_{1j} \\ Pp_{21} & Pp_{22} & \dots & Pp_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Pp_{x1} & Pp_{x2} & \dots & Pp_{xj} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Таким образом, сам технологический процесс по изготовлению судовой конструкции представляется в виде массива G, имеющего несколько вариантов решения (всего j вариантов), определяемого совокупностью технологических операций (11):

$$G = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ \dots \ g_j] \quad (11)$$

То есть, формирование технологического процесса изготовления деталей судовой корпусной конструкции осуществляется в зависимости от состава определенных параметров деталей, логических предпосылок, определяемых технологом, технологическими операциями.

Общий алгоритм принятия решения

Алгоритм принятия решения (технологического процесса) в общем виде, представлен на рисунке 1. В алгоритме учитываются: состав конструкции (детали); параметры деталей (например, массогабаритные характеристики); действия технологов, назначающих припуски на изготовление и др.; технологические операции (правка, чистка, резка, гибка, сборка, сварка и т.д.); логическое обоснование и последовательность операций и т.д.

Выбор оптимального технологического процесса производится путем сравнения нескольких вариантов процессов по изготовлению конструкции и поиска варианта, соответствующего целям.

Примером принятия решения при создании оптимального технологического процесса может служить изготовление корпусных деталей путем вырезки их из листового проката толщиной 20 мм. Эскизы деталей, полученные из 3D модели судовой конструкции с размерами представлены на рисунке 2.

Составим алгоритм выбора технологического процесса резки деталей. Целью является максимальная точность, минимальное время, затрачиваемое на осуществление резки металла, минимизация количества тепловых деформаций. Допустим, что имеется возможность провести резку металла двумя способами: тепловой (плазменной) и гидроабразивной резкой. Габариты и толщина листов металла для последующей резки этих деталей удовлетворяют условиям проведения работ при помощи этого оборудования (плазменной и гидроабразивной резки). Действия технолога заключаются в назначении допусков на резку, которые составляют +5мм на плазменную и 0,05-1 мм на гидроабразивную резку и определяются нормативной и справочной документацией.

Проведение гидроабразивной резки не предполагает проведение дополнительных операций. Плазменная резка, наоборот, требует дополнительных работ: зачистки абразивом, прорезки ходов, отверстий кислородным или воздушно-дуговым способом, применения механической обработки и

последующей правки на прессе, что значительно увеличивает время изготовления деталей, уменьшает точность изготовления, увеличивает тепловую деформацию металла. Алгоритм принятия решения, соответствующего поставленным целям представлен на рисунке 3.

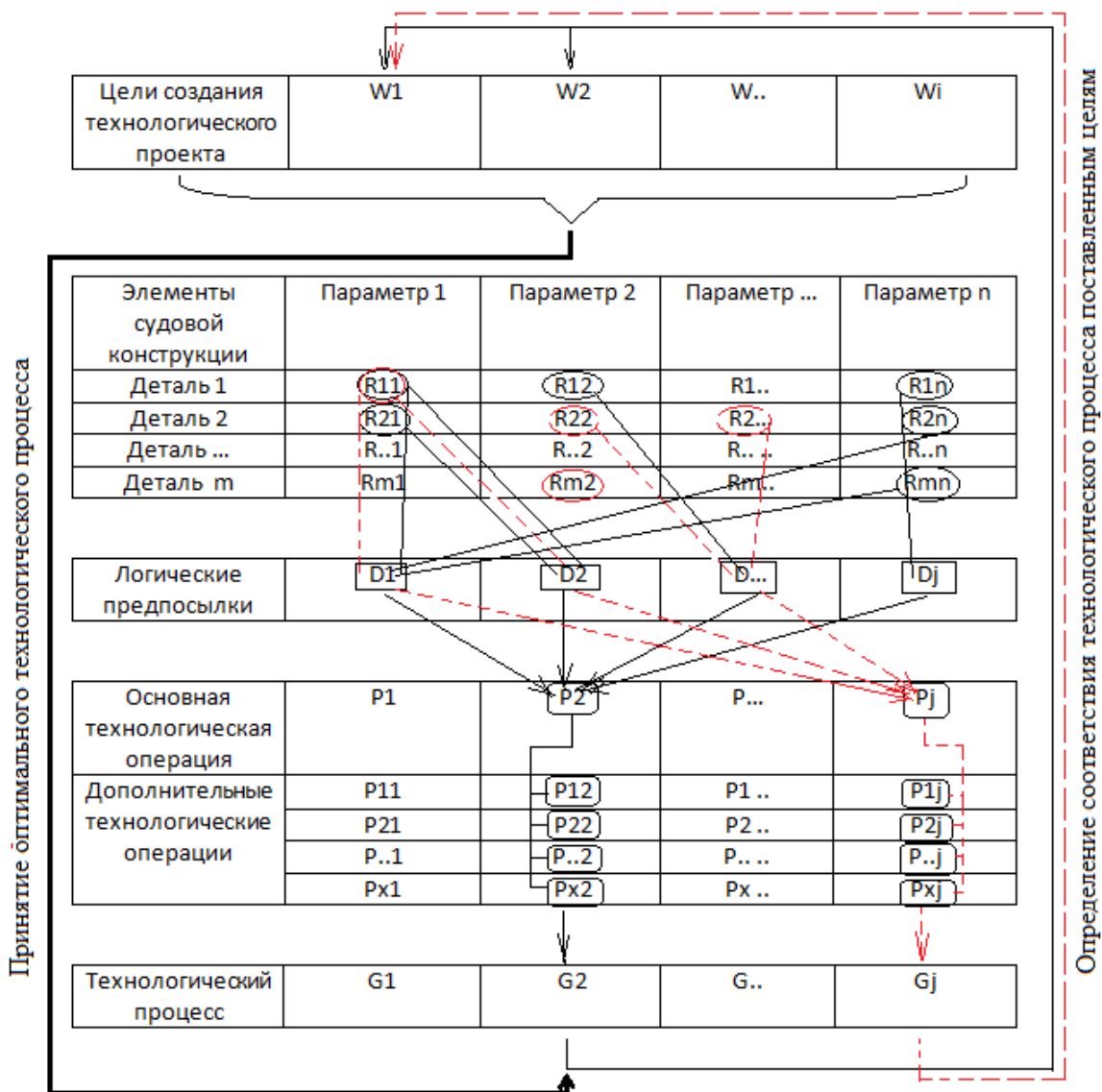


Рис. 1. Алгоритм выбора технологического процесса (G3 (черные линии и стрелки) или G4 (красные пунктирные линии и стрелки) изготовления корпусной конструкции в виде взаимосвязанных блоков-массивов

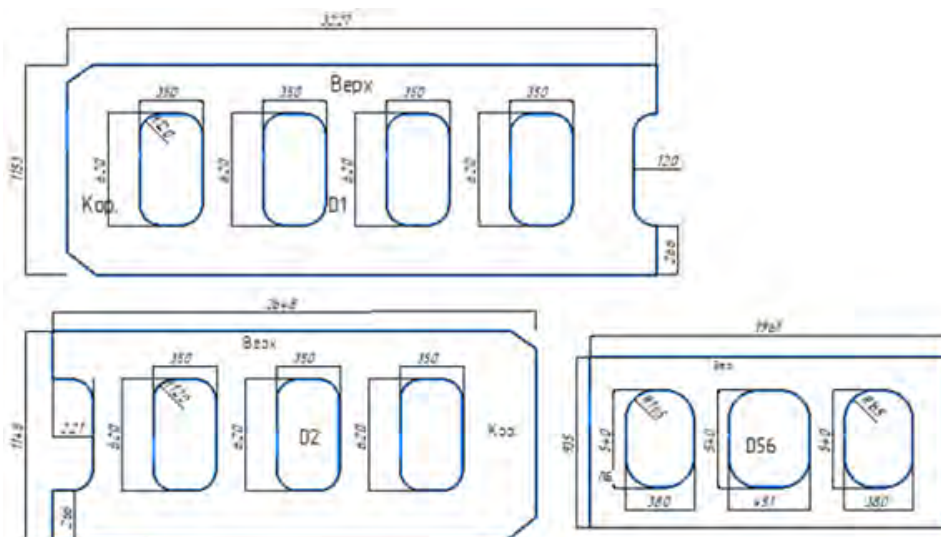


Рис. 2. Эскизы деталей 1, 2, 3, полученные из 3D модели судовой конструкции

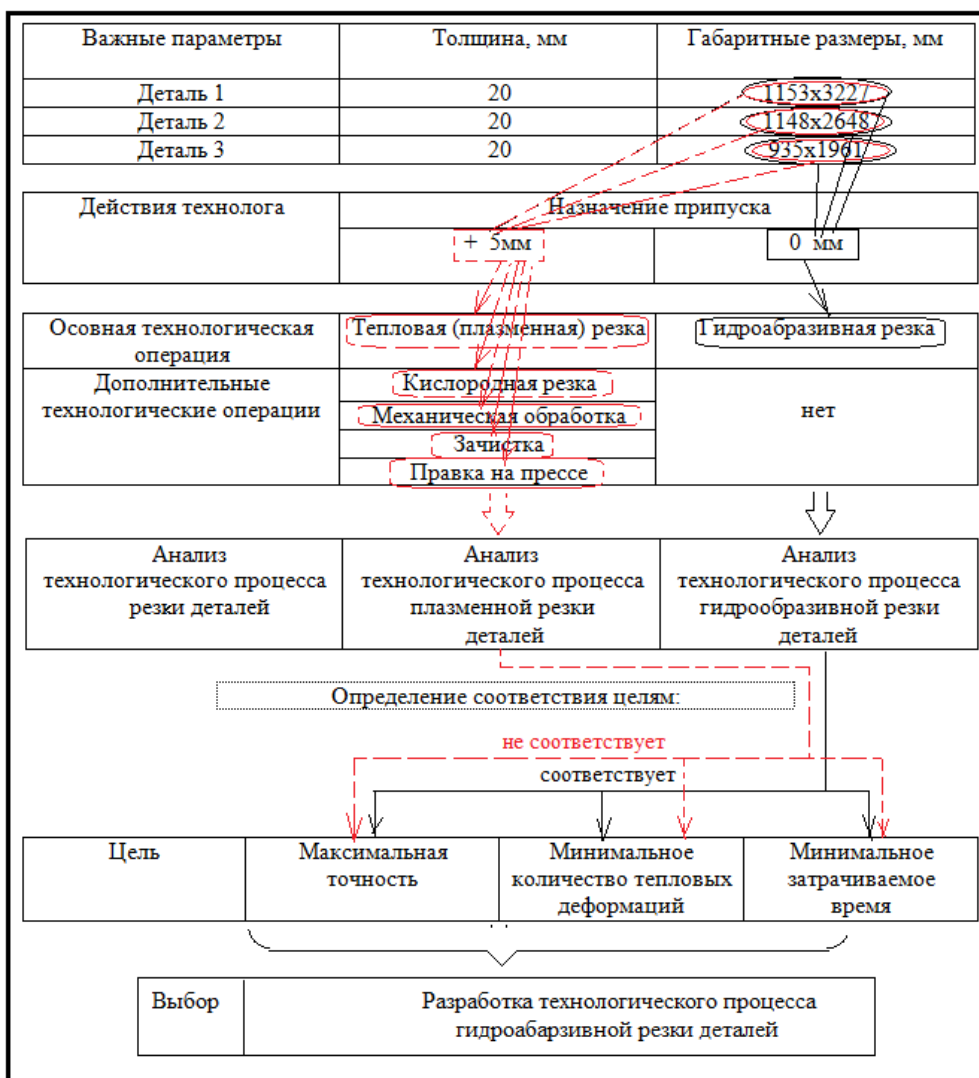


Рис. 3. Алгоритм выбора оптимального технологического процесса резки деталей

1. технологический процесс изготовления деталей способом гидроабразивной резки представлен черными сплошными линиями
2. технологический процесс изготовления деталей способом плазменной резки представлен красными пунктирными линиями

Схема разработки технологического процесса изготовления корпусной конструкции

Выбор оптимального технологического процесса изготовления корпусной конструкции можно ускорить. Для этого по известной 3D модели конструкции создается информационная модель, имеющая определенные базы данных: конструктивного характера, технологического оборудования, оснастки, инструментария, нормативно-технической и справочной литературы. Таким образом, информационная модель в таком виде позволяет автоматизировать процесс принятия оптимального решения создания технологического процесса изготовления судовой конструкции, работая по принципиальной схеме, представленной на рисунке 4.

Целями разработки техпроцесса может являться использование имеющегося оборудование или внедрение нового, получение оптимального по срокам изготовления техпроцесса или рационализация решаемых задач и т.д. При определении цели могут руководствоваться сроками изготовления конструкции, имеющимся оснащением, оборудованием, производственной мощностью, пропускной способностью и даже сезонностью проводимых работ. На это оказывает влияние существующая база технологических данных и требования базы нормативно-технической документации. Судовая корпусная конструкция состоит из деталей, которые выполняются из сортового материала, указанных в базе данных элементов корпуса судна. Заготовки выбираются из листового проката, полос, профилей из полосоубльбов, тавров, уголков и др., выпускаемых

промышленностью. Параметры деталей судовой конструкции задаются исходя из данных проекта. Параметры деталей и способ их изготовления оказывают влияние на назначение допусков и посадок, определяемые по данным базы нормативной и технической документации. Таким образом, база технологических данных и база нормативной технической документации непосредственно влияют на процесс принятия решения о создании технологического процесса. Следующим этапом производится анализ решения и создается технологический процесс на изготовление корпусной конструкции, который проверяется на соответствие заданным целям. Сплошными стрелками указывают на последовательный переход к следующему этапу, пунктирные стрелки означают возврат к исходной позиции в случае несоответствия результата целям. Таким образом, определение варианта технологического решения производится, учитывая параметры технологического процесса, заданных требованиями нормативно-технической документации и согласно, имеющейся базы технологических данных. Принятие решения производится путем сравнения имеющихся вариантов в сторону предпочтительного. Анализ уже принятого решения проводится с целью более углубленного изучения выбранного варианта.

Таким образом, решение задачи по автоматизации создания технологического процесса изготовления судовой конструкции происходит исходя из имеющихся данных 3D модели судовой конструкции, знаний о типе технологической операции, применяемом оборудовании, способах изготовления, массогабаритных показателях и производственных мощностях участка (цеха).

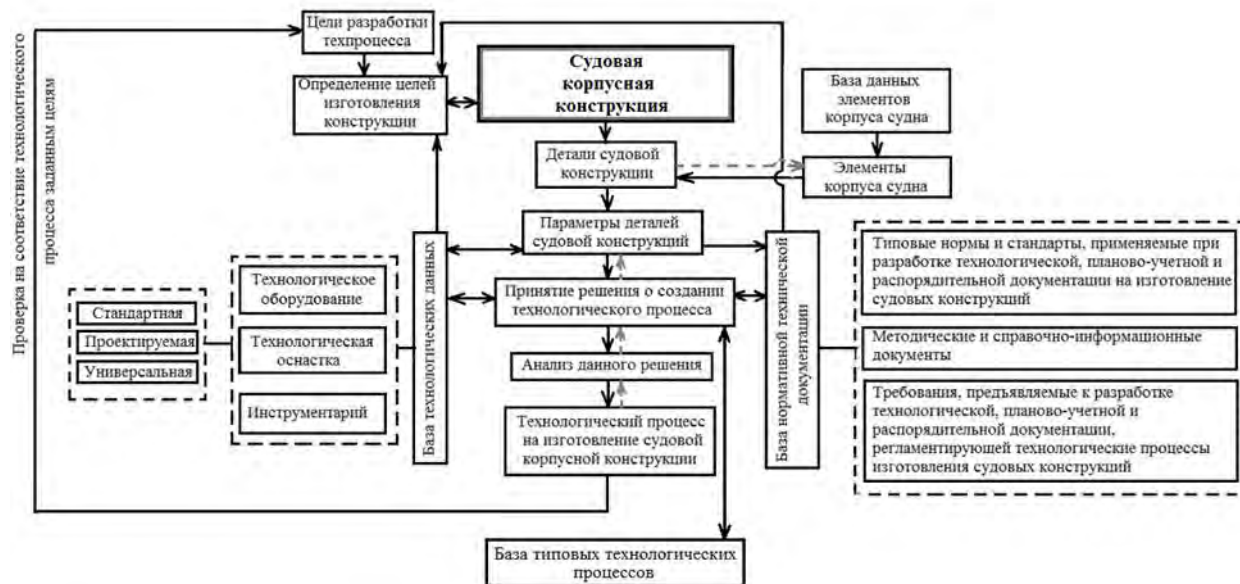


Рис. 4. Принципиальная схема разработки технологического процесса изготовления корпусной конструкции

Заключение

В статье предложена принципиальная схема автоматизированной разработки технологического процесса изготовления судовой конструкции, базирующаяся на основе информационной модели конструкции.

Предложенная концепция информационной модели судовой корпусной конструкции предполагает применение не только 3D модели конструкции, но и набор базы данных:

- стандартных элементов корпуса судна, использующих сортамент;

- технологических данных, включающих данные об имеющемся технологическом оборудовании, технологической оснастке, инструментари и др.);

- нормативно-технической и справочной документации;

- технологических операций (резка, сборка, гибка, сварка и т.п), позволяющих адекватно назначать припуски при резке металла, допуски на усадку металла при сварке, вид раздела кромок под сварку и т.д.

Для определения самого выгодного технологического процесса, отвечающего поставленным целям, необходимо на основе имеющейся информационной модели провести анализ конструкции, оборудования, оснастки, нормативной и технической документации и т.д. по предложенному алгоритму, построить все возможные маршруты изготовления судовой конструкции и путем сравнения выбрать самое рациональное решение, удовлетворяющее поставленным целям.

Создание маршрута изготовления деталей судовой конструкции происходит наряду с выбором

технологического оборудования и оснастки, определения последовательности технологических операций при изготовлении деталей. При решении задачи по оптимизации процесса принятия решения в области создания технологического процесса. Удовлетворяющего поставленным целям, анализируется структура 3D модели детали, определяются взаимосвязи между всеми параметрами детали с учетом всех ее особенностей и создается информационная модель. Это позволяет разрабатывать предварительный технологический процесс еще на этапе моделирования и проектирования конструкции.

Автоматизация проектирования технологических процессов приводит к созданию системы поддержки принятия решений. Это позволяет осуществлять формирование технологических процессов на ранних этапах существования проекта судна, повысить технологичность и ускорить процесс изготовления конструкций, снизить затраты, повысить конкурентоспособность, надежность и т.д.

Литература

1. Основы механизации и автоматизации судостроительного производства. / Под общ. ред. Соколова В.Ф. – Л.: Судостроение, 1989.
2. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / Вячеслав Васильевич Веселков, Мария Александровна Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. №1(29). - С. 82-89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89
3. Автоматизация технологических процессов, Хомченко В.Г., Федотов А.В. / Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 488 с.
4. Божеева Т.В. Автоматизация процедуры принятия решений при разработке технологических процессов / Божеева Т.В. Фокин И.В. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. №1(53). С. 67-72.
5. Голота Г.Ф. Техническое нормирование труда в судоремонте. Справочник. Л.: Судостроение, 1983.
6. 89.02-1.12.001-2015 «Комплексная программа модернизации конструкторско-технологической подготовки и процессов строительства заказов в ОАО «ПО «Севмаш».
7. Говорков А.С., Божеева Т.В., Жилыев А.С., Токарев Д.О. Разработка и внедрение программного комплекса «Автоматизированная система разработки технологических процессов на базе существующих взаимосвязей» при запуске изделий в производство. Авиационное строительство и транспорт Сибири: сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. 2016. С. 26–29.

References

1. Osnovy mekhanizatsii i avtomatizatsii sudostroitel'nogo proizvodstva [Fundamentals of mechanization and automation of shipbuilding production] Under the General editorship of Sokolova V. F. L.: Shipbuilding, 1989.
2. Veselkov V. V. Principy realizatsii i razvitiya tekhnologii avtomatizirovannogo izgotovleniya korpusnyh konstrukcij [Principles of implementation and development of technology for automated manufacturing of hull structures]/ Vyacheslav V. Veselkov, Maria A. Kobets. Bulletin of the Admiral Makarov state University of the sea and river fleet. 2015. №1(29). p. 82-89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89
3. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov [Automation of technological processes]. Khomchenko V. G., Fedotov A.V. Textbook. Omsk: Publishing house Omgutu, 2005. 488 p
4. Bagaeva T. V. Avtomatizatsiya procedury prinyatiya reshenij pri razrabotke tekhnologicheskikh processov [Automation of the decision-making procedure in the development of technological processes]. Bagaeva T. V. Fokin, I. V. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2017. №1(53). Pp. 67-72.
5. Golota G. F. Tekhnicheskoe normirovanie truda v sudoremonte. Spravochnik [Technical regulation of labor in ship repair. Directory]. - L.: Shipbuilding, 1983.
6. 89.02-1.12.001-2015 «Kompleksnaya programma modernizatsii konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i processov stroitel'stva zakazov v OAO «PO «Sevmash» [Comprehensive program of modernization of design and technological preparation and construction processes of orders in JSC "PO " Sevmash"].
7. Govorkov A. S., Bozheeva T. V., Zhilyaev A. S., Tokarev D. O. Razrabotka i vnedrenie programmno kompleksa «Avtomatizirovannaya sistema razrabotki tekhnologicheskikh processov na baze sushchestvuyushchih vzaimosvyazey» pri zapuske izdelij v proizvodstvo [Development and implementation of the software package "Automated system for developing technological processes based on existing relationships" when launching products into production]. Aircraft Engineering and transport of Siberia: SB.art. VII vseros. scientific-practical Conf. 2016. p. 26-29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лебедева Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения, Институт Судостроения и Морской арктической Техники, филиал САФУ в г. Северодвинске, Россия, 164500, Северодвинск, улица Капитана Воронина, 6а, e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Elena G. Lebedeva, Ph.D.(Eng), associate Professor of the Department of shipbuilding Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology, branch of the Northern Federal UNIVERSITY in Severodvinsk, 6A Kapitana Voronina street, 164500 Severodvinsk, Russia, e-mail: eg.lebedeva@narfu.ru

Сомпольцева Анна Александровна, аспирант САФУ, старший преподаватель, Место работы – филиал САФУ в г. Северодвинске, Институт Судостроения и Морской арктической Техники, Россия, 164500, Северодвинск, улица Капитана Воронина, 6а, e-mail: a.sompoltseva@narfu.ru

Anna A. Sompoltseva, graduate student , senior lecturer, Place of work – the branch of NARFU, Severodvinsk Institute of Shipbuilding and Maritime Arctic engineering, 6A Kapitana Voronina street, Severodvinsk, 164500, Russia, e-mail: a.sompoltseva@narfu.ru

УДК 629.122/.123.004.67(083)

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.008

Концепция автоматизированной подготовки ремонтной документации

О.К. Зяблов¹, Ю.А. Кочнев¹, И.Б. Кочнева¹¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация В статье рассматривается возможность автоматизации подготовки производства по ремонту судов. Указывается, что высокая трудоемкость работ по подготовке ремонтной документации (под которой, в статье понимаются такие организационно-технические документы, как ремонтные ведомости, акты дефектации, заказы-наряды и т.п.) требует больших временных затрат, которые, в условиях ограниченности ремонтного периода, целесообразно снижать. Одним из способов сокращения времени может послужить внедрение автоматизированных систем подготовки ремонтной документации, как на предварительных этапах ремонта, так и непосредственно на «кильблоках». В статье представлена структура необходимых работ, с учетом возможной автоматизации большинства процессов и особенностей работ на различных предприятиях. Подробно выделен один из наиболее трудоемких этапов – дефектация, с подробным описанием его внутренней структуры и потоков информации, характерных как для традиционного подхода в его организации, так и с применением средств автоматизации. Уделено особое внимание подготовительным работам при дефектации, а именно формированию растяжек наружной обшивки, палуб, переборок, второго дна, вторых бортов и т.п., которые для судов возрастом более 25 лет, по опыту работ авторов с грузовыми судами внутреннего и смешанного (река-море) плавания, как правило, уже или потеряны, или находятся в непригодном для работы состоянии.

Ключевые слова: судоремонт, автоматизация, технологическая подготовка, дефектация, типовые обобщённые модели технологии ремонта, ведомости ремонта.

The concept of automated preparation of repair documentation

Oleg K. Zyablov¹, Yury A. Kochnev¹, Irina B. Kochneva¹¹Volga State University of Water Transport

Abstract. The article considers the possibility of automating the preparation of production for ship repair. It is indicated that the high labor intensity of repair documentation requires large time expenditures, which, in the limited repair period, it is advisable to reduce. One of the ways to reduce the time can be the introduction of automated systems for preparing repair documentation, both at the preliminary stages of repair, and directly on the "keelblocks". The article presents the structure of the necessary work, taking into account the possible automation of most processes and the features of work at various enterprises. One of the most time – consuming stages-defecation-is highlighted in detail, with a detailed description of its internal structure and information flows, which are typical both for the traditional approach in its organization and with the use of automation tools. Special attention is paid to the accompanying works in case of defects, namely, the formation of the stretch of the outer hull covering, which for vessels older than 25 years, as a rule, has already been lost or is in an unusable condition.

Key words: ship repair, automation, technological preparation, fault detection, typical generalized models of repair technology, repair sheets.

Введение

Непосредственно перед началом ремонтных работ по устранению дефектов корпуса судна, перед судоремонтным заводом и судовладельцем встают задачи дефектации, расчёта прочности, определения стоимости предстоящего ремонта и оценки его целесообразности, калькуляции фактической стоимости ремонта и т.д. Хотя такие работы не участвуют в процессе восстановления технического состояния корпуса судна, они неразрывно с ним связаны. Их основной недостаток – большие время- и трудозатраты, сократить которые можно за счет рациональной организации с применением различных автоматизированных систем, в том числе автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП), которых в области судоремонта практически не существует.

Созданием такой системы подготовки ремонтной документации (АПРД) занимаются на кафедре проектирования и технологии постройки судов (ПиТПС) Волжского государственного университета водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»). Для её полноценного функционирования необходима схема потоков информации, которая характерна для автоматизированных систем, но может быть применена и при традиционном подходе, в связи с наличием большого объема уникальных работ по каждому судну.

Модель подготовки ремонтной документации

Если применить принципы «системного» подхода к организации работ, то можно графически показать большое наличие связей между отдельными функциональными элементами (рисунок 1)

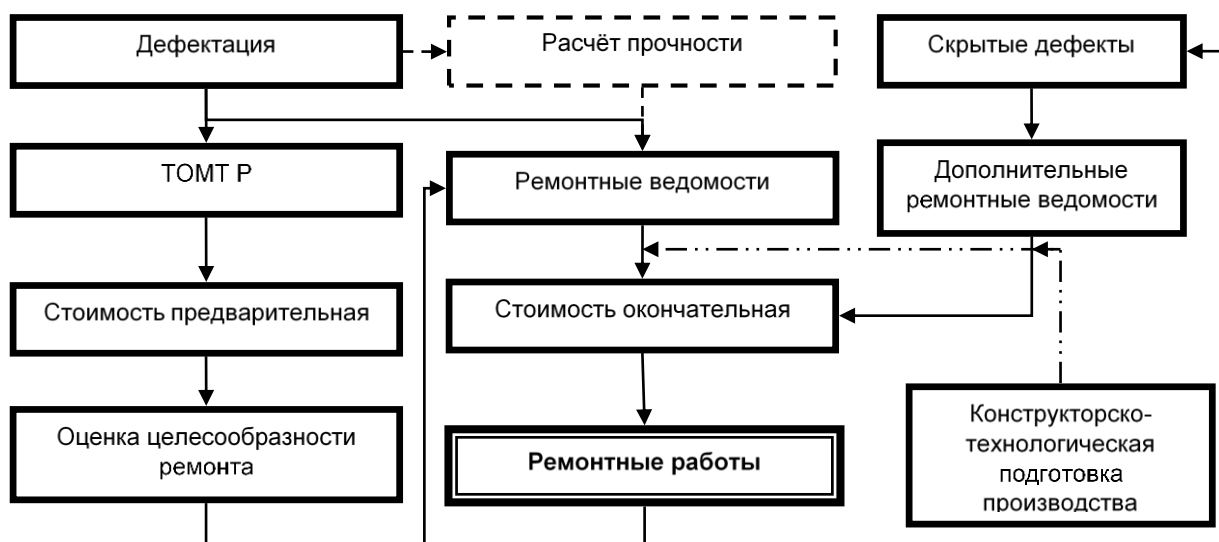


Рис. 1 Структурная схема взаимосвязи основных и подготовительных этапов судоремонта

Во всех представленных блоках требуется выпуск большого пакета документации. Для судна, старше 25 лет [1] объем освидетельствований увеличивается, а соответственно и возрастают финансовые издержки судовладельца на дефектацию и ремонтные работы,

Условно, для целей настоящей работы, разделим все виды необходимой документации на три вида:

- конструкторско-технологическая документация непосредственно ремонтных работ, выполняемая сотрудниками судоремонтного предприятия, в зависимости от фактически необходимого объема, включающая чертежи заменяемых деталей и узлов, технологии их изготовления в цехе и т.д.;

- технико-экономические расчёты предстоящего ремонта, так же выполняемые на предприятии. Авторами разработана система автоматизированной подготовки подобной документации, включающей, акт дефектации, принципиальные технологии всех видов работ, основанные на типовых технологических процессах судоремонта [2,3,4];

- подготовительные работы по определению объёма предстоящего ремонта судна: дефектация,

разработка рекомендаций по восстановлению технического состояния отдельных элементов судна, расчёт фактической общей прочности судна.

Последний этап связан с обширным объемом однотипных вычислений, к тому же, для его выполнения необходимо специализированное программное обеспечение, требующее наличия одобрения Российского Речного Регистра.

Алгоритм дефектации судна

Нами, в рамках АПРД, была разработана и частично реализована концепция выполнения подобных работ [5], содержащая:

- автоматизацию вычислительных процедур, с явным представлением их в итоговом отчёте;
- автоматизацию передачи данных их графического редактора, с подготовленной растяжкой наружной обшивки корпуса судна, в табличный процессор Excel и обратно [6].

В общем виде порядок работ на этапе дефектации и расчёта прочности (рисунок 1) можно представить в виде блок-схемы рисунок 2.

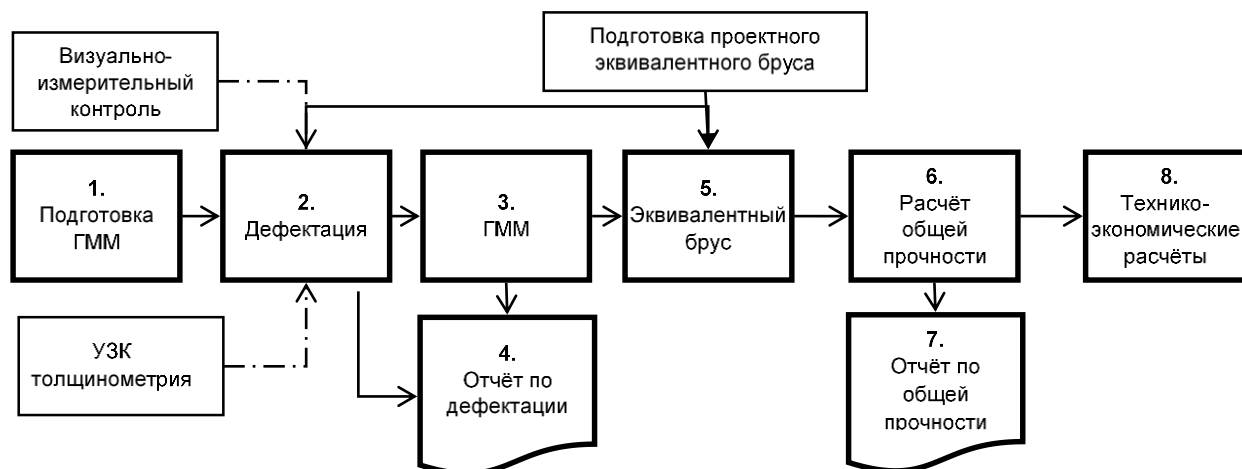


Рис. 2. Схема работ при дефектации и расчёте общей прочности

Блок один представляет собой подготовку графо-математической модели (ГММ) корпуса судна (проектных растяжек наружной обшивки, палуб, переборок, второго дна, вторых бортов и т.п., совместно с набором, в электронном виде). Блок два, на основе выполненной модели, создает необходимые формы для заполнения и хранения замеров остаточных толщин. После чего данные вновь передаются на растяжку наружной обшивки (блок три), в которой осуществляется нанесение существующих дефектов корпуса судна, полученных на основе ультра-звуковой (УЗК) толщинометрии и визуально-измерительного контроля. На основе блоков два и три, в блоке четыре формируется отчет по дефектации, который является итоговым документом и передается в Регистр.

Так как общая продольная прочность корпуса зависит от фактических толщин, то и связанные с ней

расчёты неразрывно связаны с выделенным третьим видом работ, которые на основе полученных данных в блоке пять и графо-математической модели проектного эквивалентного бруса (ЭБ) создают фактический ЭБ судна. В блоке шесть производят расчёт действующих и предельных изгибающих моментов. Вывод окончательного документа, который передается в Регистр, осуществляется в блоке семь.

Приведённые этапы работ характерны как при «ручном» оформлении документов, так и при автоматизированных работах.

Графо-математическая модель

Разработку графо-математической модели корпуса судна представим в виде рисунка 3.

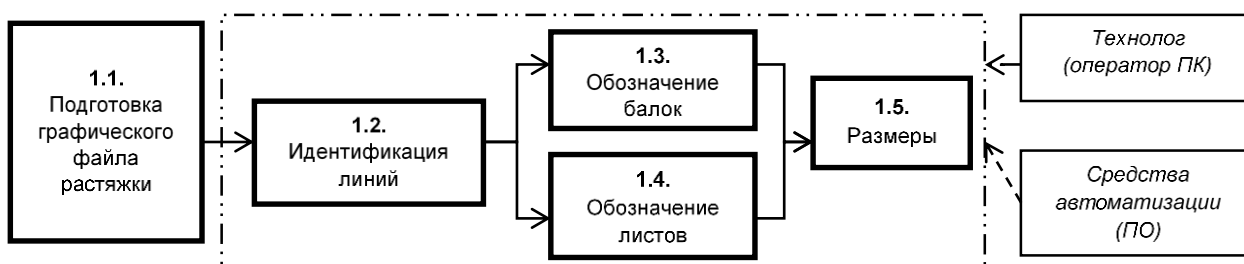


Рис. 3 Блок схема подготовки ГММ

На шаге 1.1 формируется, привычная инженерам-конструкторам, растяжка, с нанесением условных линий, обозначающих балки набора, листы, стыки и пазы. Следующий шаг (блок 1.2) подразумевает присвоение условных обозначений в базе данных растяжки каждой из указанных линий: паз, стык, рамный продольный набор и т.д. Наличие обозначений, позволяет в блоках 1.3 и 1.4 присвоить номера, как каждому листу, так и всем балкам.

Шаг 1.5 присваиваются конкретные размеры балкам набора и указываются проектные толщины листов, которые необходимы для выполнения дальнейших расчётов [6]. Работы по шагам 1.2-1.5 могут быть выполнены как оператором персонального компьютера (ПК) – технологом завода или специалистом по дефектации, так и в автоматизированном режиме под контролем первого.

Похожие шаги выполняются и при формировании графо-математической модели проектного ЭБ: подготовка графического файла поперечного сечения корпуса, идентификация линий, обозначение и связи балок набора и листов с растяжками, присвоение размеров. Следует заметить, что данные этапы могут являться единичными для судна, а дальнейшая информация по ним должна накапливаться у судовладельца, например, в виде электронного паспорта судна [7].

Блок два «Дефектация» (рисунок 2), возможно представить в виде шагов, приведённых на рисунке 4. Данный блок автоматизирует рутинные процессы переноса информации из графического процессора в расчётные таблицы, аналогично тому, как в следующем блоке 3 информация передается обратно в графический процессор.

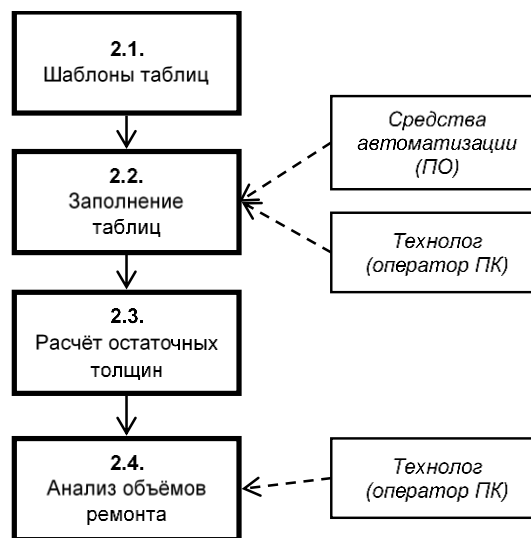


Рис. 4 – Блок «Дефектация»

Реализация предложенных концепций по передаче данных из документов, имеющих различное представление (графическое, текстовое, табличное) может быть выполнена с применением общемашиностроительного, так называемого «лёгкого» САПР: AutoCAD или КОМПАС 3D. Написание на встроенных языках программирования специализированных «надстроек», направленных именно на поиск в файлах необходимой информации и передача её в требуемый формат, является относительно простой задачей, и была нами реализована.

Для выполнения блоков 5,6,7 (рисунок 2) требуется или специализированное программное обеспечение (ПО), одобренное Регистром, либо применение методов с явным представлением решений [5]. В любом случае трудоемкая часть работы, связанная с подготовкой исходных данных по эквивалентному брусу, может быть автоматизирована путем передачи данных с акта дефектации. К числу такой информации относятся: расположение балок набора главного и перекрёстного направления, фактические толщины листов и размеры набора.

Типовая обобщенная модель технологии

Этап «ТОМТ Р» (рисунок 1) предназначен для автоматизации процесса формирования технологических карт ремонта, на базе типовых обобщенных моделей технологии ремонта (ТОМТ Р), выполненных в форме таблицы в среде Excel.

ТОМТ Р – это система, состоящая из структурно-технологической схемы процессов, перечня средств технологического оснащения и основных расчетных показателей, пригодная для многих предприятий, отражающая почти все возможные ситуации производства [8].

Таблица 1

Типовая обобщенная модель технологии ремонта

Наименование операции	Шифр СТО	Трудоёмкость	Состав звена	Прямая заработная плата
1	2	3	4	5
ТК-1.				
....
ИТОГО по ТК -1				
ТК-2.				
....
ИТОГО по ТК -2				
....
Всего по производству				
Отпускная стоимость ремонта				

Основной сложностью при использовании таблиц ТОМТ Р является формализация данных из растяжек к удобному, для расчёта трудоёмкости, виду. Следовательно, необходимы те же растяжки, что и для этапа «Дефектация».

ТОМТ Р разрабатываются на основании типовых технологических процессов ремонта (ТПП Р), поэтому их количество должно быть равным количеству ТПП Р. Однако большинство операций в ТПП, применяемых для работ на отечественных судоремонтных предприятиях, повторяются из процесса в процесс, поэтому в АПРД технологические операции объединены в технологические комплекты, такие как:

- смена листов обшивки;
- правка обшивки вмятины с заменой и правкой набора;
- замена обшивки вмятины с заменой и правкой набора;
- правка бухтин и гофрировок с нагревом и усилиями;
- замена обшивки в районе бухтины, гофрировки, цементной заделки, дублирующего листа, пробоины;
- устранение трещины в наружной обшивке.

Данное объединение позволяет упростить расчеты и дальнейшее формирование технологических карт ремонтных работ.

Трудоёмкость работы по каждой *j*-ой операции *i*-го технологического процесса в системе ТОМТ Р может быть рассчитана по формуле

$$A_{ij} = f_{ij}(L, B, S)$$

где *L, B, S* – габаритные размеры ремонтируемого элемента, учитываемые в объёме выполнения *j*-ой операции (длина, площадь, количество резов и т.д.) в *i*-ом технологическом процессе;

f_{ij} – показатель некоторой функции, связывающей норматив времени выполнения *j*-ой операции *i*-го технологического процесса с объемом работ.

Трудоёмкость ремонта дефекта в целом определяется как

$$A_i = \sum_{j=1}^{z-1} A_{ij} + K_{др} \sum_{j=1}^{z-1} A_{ij} = (1 + K_{др}) \sum_{j=1}^{z-1} A_{ij}$$

где *z* – общее количество операций в *j*-ом технологическом процессе;
K_{др} – коэффициент, учитывающий дополнительные работы.

Итогом расчётов по форме таблицы 1 становится результат этапа «Стоимость предварительная», которая равна

$$S = S_m + 3 + S_n$$

где *S_m* – затраты на приобретение материалов;
 3 – заработная плата рабочих, определяемая по фактической трудоёмкости выполненных работ *A_i*;
S_n – накладные и прочие расходы [3].

Ведомости ремонта

Другой подход к расчёту стоимости ремонтных работ, так же реализованный в системе АПРД, и дающий более точные результаты, это расчёт на основе ремонтных ведомостей. Фактическая трудоёмкость в данном случае может быть найдена по эмпирическим зависимостям [9]. Их так же можно использовать и при обнаружении «скрытых дефектов», после разработки дополнительных ремонтных ведомостей. Схема формирования ведомостей ремонта приведена на рис. 5.

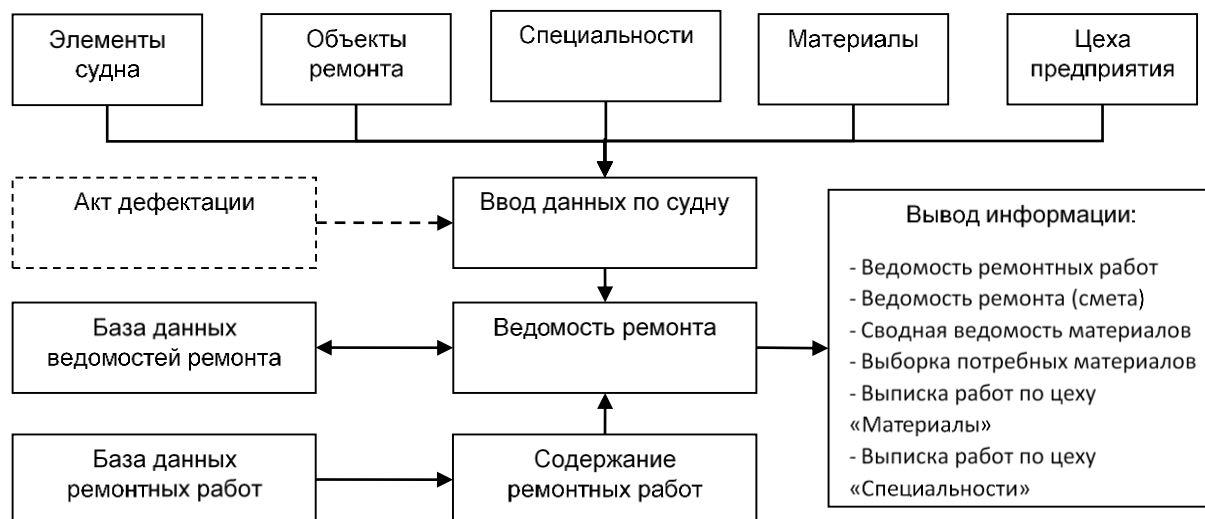


Рис. 5 – Структура блока «Ведомости ремонта»

Данные по судну и необходимому объему ремонта хранятся в базе данных системы. Использование унифицированной базы данных в составе программы и введение экономических коэффициентов по заработной плате, материалам, НДС позволяет произвести автоматический расчёт отпускной стоимости ремонтных работ и получить пакет ремонтной (организационно-технической) документации. Электронные формы этой документации по виду и содержанию полностью соответствуют заводским формам и включают: ведомости ремонта, сметы и калькуляции (основные и дополнительные); выборки потребных материалов по ремонту судна (по цехам); сводные ведомости расходных материалов по ремонту судна; заказ-наряды по материалам и по специальностям (по цеху с привязкой к работам) и пр.

Унифицированная база данных обладает гибкостью, может изменяться в соответствии с технической оснащённостью судоремонтного предприятия, парком ремонтируемых судов, пополняться данными по ремонту специального технологического оборудования судов (черпаковые устройства, классификаторы для черпаковых

земснарядов, грунтовые насосы и грунтопроводы для землесосов и т.д.) технического и др. флота, а также новыми технологическими способами ремонта.

Заключение

Предложенная структуризация и схематизация позволяет разработать программное обеспечение с его интеграцией как в офисные пакеты, в настоящее время имеющиеся на всех судостроительных предприятиях, так и в общемашиностроительные (КОМПАС, AutoCAD и т.д.). Такой подход существенно сокращает временные и трудовые затраты на конструкторскую и технологическую подготовку производства, тем самым увеличивает производительность труда всего предприятия и позволяет её приблизить к мировым стандартам.

При этом, с учётом автоматизации процесса, возникает возможность снижения требований к уровню подготовки инженера-технолога, что позволит высвободить наиболее квалифицированные кадры для решения главных ответственных задач.

Литература

1. Российский Речной Регистр. Правила. М. 2019, режим доступа <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rulesrrr2019.pdf>
2. Зяблов О.К. Разработка системы автоматизированного проектирования технологических процессов ремонта судов внутреннего плавания / О.К. Зяблов, Ю.А. Кочнев // Речной транспорт (XXI век), № 2(82), 2017 – С. 43-45
3. Зяблов О.К. Разработка типовых обобщённых моделей ремонта судна / О.К. Зяблов, Ю.А. Кочнев // Вестник Волжской Государственной академии водного транспорта, №50, 2017 – С.113-118
4. Корпуса стальных судов внутреннего и смешанного плавания. Типовые технологические процессы ремонта. ТТП 212.2013-05-07. ООО НПФ «Экосудопроект». – Н. Новгород: НПФ «Экосудопроект», 2013. – 148 с.
5. Бурмистров Е.Г. Комплексная автоматизированная система технологической подготовки судоремонтного производства / Е.Г. Бурмистров, О.К. Зяблов, Е.П. Роннов // МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 4 (42) Т. 2 2018 - с. 92-97
6. Зяблов О.К. Автоматизированное формирование отчёта по дефектации судна с использованием графоматематической модели корпуса / О.К. Зяблов, Ю.А. Кочнев, И.Б. Кочнева // Вестник Волжской Государственной академии водного транспорта, №59, 2019 – С. 62-69
7. Тимин А.Э. Конфигурация электронного паспорта судна / Тимин А.Э., Филиппов Е.В., Огнева В.В., Бурмистров Е.Г. // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, №51, 2017 – С. 28-31

8. Кулик Ю.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии: конспект лекций в ключевых словах и понятиях. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2004. – 74 с.
9. Зяблов О.К. К вопросу автоматизации технологической подготовки производства по ремонту судовых корпусов // Научно-методическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов Волжской государственной академии водного транспорта, 2005., Нижний Новгород. – [материалы]: Юбилейный вып., Часть III. –Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2005 – С. 131-133

References

1. Rossijskij Rečnoj Registr. Pravila [Russian river register. Rules]. M. 2019, režim dostupa <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rulesrrr2019.pdf>
2. Zjablov O.K. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh processov remonta sudov vnutrennego plavaniya [The development of systems of the automated designing of repair technological processes of inland navigation vessels] / O.K. Zjablov, Yu.A. Kochnev // Rečnoj transport (XXI vek), № 2(82), 2017 – S. 43-45
3. Zjablov O.K. Razrabotka tipovyh obobshchyonnyh modelej remonta sudna [Development of a model aggregate patterns of vessel repair] / O.K. Zjablov, Yu.A. Kochnev // Vestnik Volzhskoj Gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta, №50, 2017 – S.113-118.
4. Korpusa stal'nyh sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya. Tipovye tekhnologicheskie processy remonta. [Hulls of steel vessels of inland and mixed navigation. Standard technological processes of repair.] TTP 212.2013-05-07. ООО NPF «Ekosudoproekt». – N. Novgorod: NPF «Ekosudoproekt», 2013. – 148 s.
5. Burmistrov E.G. Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema tekhnologicheskoy podgotovki sudoremontnogo proizvodstva [Integrated automated system of technological preparation of ship repair production] / Evgeny G. Burmistrov, Oleg K. Zjablov, Evgeny P. Ronnov // Marine intelligent technologies 4 (42) T. 2 2018 - s. 92-97
6. Zjablov O.K. Avtomatizirovannoe formirovanie otchyota po defektacii sudna s ispol'zovaniem grafomatematiceskoy modeli korpusa [Automated generation of a report on ship defects using a graph-mathematical model of the hull] / O.K. Zjablov, Yu.A. Kochnev, I.B. Kochneva // Vestnik Volzhskoj Gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta, №59, 2019 – S. 62-69
7. Timin A.E. Konfiguraciya elektronnoho pasporta sudna [Configuration of the vessel's electronic passport] / Timin A.E., Filippov E.V., Ogneva V.V., Bur-mistrov E.G. // Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta, №51, 2017 – S. 28-31
8. Kulik Yu.G. Maloohodnye i resursosberegayushchie tekhnologii: konspekt lekcij v klyuchevykh slovah i ponyatiyah [Low-waste and resource-saving technologies: lecture notes in keywords and concepts]. – N. Novgorod: VГАVТ, 2004. – 74 s.
9. Zjablov O.K. K voprosu avtomatizacii tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva po remontu sudovyh korpusov [On the issue of automation of technological preparation of production for repair of ship hulls] // Nauchno-metodicheskaya konferenciya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov i specialistov Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta, 2005., Nizhnij Novgorod. – [materialy]: YUbilejnyj vyp., CHast' III. – N. Novgorod: Izd-vo FGOU VPO «VГАVТ», 2005 – S. 131-133

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Константинович Зяблов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: zyablov_ok@mail.ru

Юрий Александрович Кочнев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Ирина Борисовна Кочнева, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru

Oleg K. Zjablov, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: zyablov_ok@mail.ru

Yuri A. Kochnev, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Technology of Building Ships, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: tmnnkoch@mail.ru

Irina B. Kochneva, PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: iringre@mail.ru

УДК 621.793.71:620.1

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.009

Метод исследования параметров поверхностного упрочнения деталей с защитным покрытием

П.А. Бимбереков¹, А.О. Токарев¹, Е.С. Федотова¹

¹Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Поверхностные покрытия деталей получили широкое распространение в технике, в том числе для судовых энергетических установок, а также вспомогательных судовых механизмов и устройств. Для экспериментального исследования работоспособности деталей на контактные силовые воздействия используются как цельные образцы, разделяемые после силового воздействия в месте его приложения, так и составные образцы, силовое воздействие на которые производится в месте стыка отдельных элементов. В последнем случае деформирующее разделение образца и получение нежелательных дополнительных пластических деформаций в ходе разделения исключаются. При обеспечении равной точности результата этих методов второй является более надёжным, не требующим контроля побочных деформаций для анализа зоны деформации получаемой от планового силового контактного воздействия. Нанесение поверхностного слоя осложняет использование составных образцов при исследовании зон пластической деформации. Процедура их получения и испытания может быть усовершенствована.

Предлагаются варианты формирования образцов, а также способы их получения и использования. Делается заключение об упрощении процедуры экспериментальных исследований при использовании предлагаемых образцов и получении более достоверных результатов. Обращается внимание на возможность одновременного ведения испытания для разных материалов деталей, что предполагает сокращение расхода наносимого материала покрытия и трудоёмкости работ.

Ключевые слова: образцы для испытаний, износостойкие покрытия, пластическая деформация, контактные нагрузки, процедура испытаний, составной образец.

Method for studying the parameters of the surface hardening of parts with a protective coating

Pavel A. Bimberekov¹, Alexander O. Tokarev¹, Ekaterina S. Fedotova¹

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract/ Surface coatings of parts are widely used in engineering, including for ship power plants, as well as auxiliary ship mechanisms and devices. For experimental study of the performance of parts for contact force effects, both whole samples that are share separated after the force action at the place of its application, and composite samples that are subjected to force action at the junction of individual elements are used. In the latter case, deforming separation of the sample and unwanted additional plastic deformations during separation are excluded. While ensuring equal accuracy of the results of these methods, the second method is more reliable and does not require control of side deformations for analyzing the deformation zone affected by the planned force contact action. The application of a surface layer complicates the use of composite samples in the study of plastic deformation zones. Procedure for obtaining and testing them can be improved.

Options for forming samples, as well as ways to obtain and use them are offered. The conclusion is made about simplification of the experimental research procedure when using the proposed samples and obtaining more reliable results. Attention is drawn to the possibility of simultaneous testing for different materials of parts, which implies a reduction in the consumption of the coating material applied and the complexity of work.

Keywords: test samples, wear-resistant coatings, plastic deformation, contact loads, test procedure, composite sample.

Введение

Детали с нанесённым покрытием могут подвергаться местным пластическим деформациям как в ходе дополнительной обработки методами поверхностного пластического деформирования, так и в ходе эксплуатации от воздействия местных ударных нагрузок. Примером может служить, упрочнённая методом плазменного напыления износостойкими покрытиями поверхность гребных винтов, которая может после напыления обрабатываться шариковым или роликовым инструментом, а в ходе эксплуатации подвергаться множественным местным ударным нагрузкам на мелководье с гравийным и галечным грунтом дна водоёма. В этой связи актуальным является вопрос об исследовании зоны пластической деформации деталей с покрытиями при местном контактном воздействии. Существует ряд методов

экспериментального определения зон пластической деформации в месте действия сил. Эти методы имеют недостатки при приложении к вопросу определения зон пластической деформации от местных нагрузок деталей с нанесённым поверхностным слоем. На устранение некоторых из них направлена данная работа.

1. Анализ известных методов и устройств для экспериментального исследования зоны пластического деформирования в месте контактного силового воздействия

Известны методики исследования параметров пластического упрочнения деталей поверхностным деформированием. К ним в частности относятся метод измерения глубины упрочнённого слоя под отпечатком после силового контактного воздействия [1]. После вдавливания образец разделяют, полируют и твёрдомером измеряют твёрдость под

отпечатком в точке линии действия силы. Величину пластически деформированной зоны определяют, как предельную глубину, на которой твёрдость под отпечатком больше исходной. Недостатком методики является возможность получения дополнительных пластических деформаций при разделении образцов в месте определения зоны пластического деформирования.

Для фиксации зон деформаций обычно используют метод делительных сеток [2], применимы также ультразвуковой метод и метод вихревых токов [3], [4].

Приведём также методику, при которой используется метод наблюдения линий скольжения на полированной поверхности стыка составных образцов под отпечатком в точках линии действия силы [1]. Данная методика не позволяет исключить влияние неровности поверхности и разной толщины нанесённого слоя, в частности напылённого слоя, отдельно полученных элементов образца.

Наиболее близким аналогом является способ определения деформации разрезных образцов вследствие воздействия штампа, при этом в разёмы этих образцов вставляют координатные сетки из тонкой фольги, а деформацию образца определяют по деформации сетки [5]. Данный способ не позволяет гарантированно исключить изменение механических свойств и геометрии разрезных элементов образца с нанесённым поверхностным слоем при воздействии режущего инструмента. Кроме этого методика не может гарантировать отсутствие значимой неровности поверхности и разной толщины напылённого слоя разрезанных элементов образца в месте сочленения.

Цель предлагаемых образцов и способа их использования с нанесённым износостойким покрытием – упрощение процедуры и увеличение достоверности результата определения зоны пластической деформации (исследование закономерностей деформирования) от контактного силового воздействия.

2. Сущность предлагаемого технического решения

Поставленная цель достигается тем, что составной образец в плоскостях его сопряжений оснащается делительной сеткой. Делительная сетка может быть получена путём нанесения рисок, точек, окрашивания, царапанием, термическим воздействием лазером, термической штамповкой, химическим травлением и/или сетка (в частности металлическая, полимерная) устанавливается. После нанесения делительной сетки и сборки образца на поверхность наносится износостойкий слой. Деформирующее воздействие производится в месте сопряжения отдельных элементов составного образца. Зона деформации определяется в плоскостях стыков сопрягаемых элементов образца путём оценки изменений свойств отдельных элементов. Для этого применимы методы измерения твёрдости, ультразвуковой метод, микроскопический метод - по линиям скольжения, или по деформации нанесённых или вставных сеток.

3. Варианты реализации

Составной образец из элементов (рис. 1) собирается и фиксируется в опорном контуре 7 и/или на крепёжных элементах соединяющих

непосредственно элементы образца (рис.2). Стыки элементов образца могут располагаться под разными углами друг к другу (смотри рис.1). На поверхности стыков наносят делительные разметочные сетки (не показаны). После сборки образца на него наносится износостойкое защитное покрытие. Методами нанесения защитного покрытия могут быть: намораживание, гальваническое покрытие, лазерное и/или плазменное напыление и т.д.

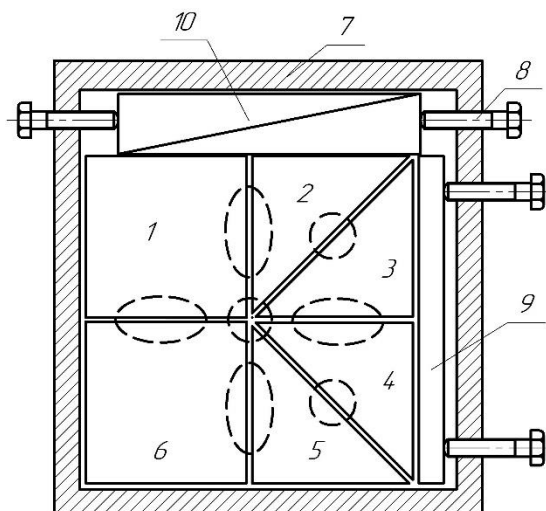


Рис. 1. Формирование составного образца из элементов: 1...6 – элементы образца, 7 – опорный контур, 8 – болты, 9 – прижимная планка, 10 – клиновой зажим. Пунктиром изображены возможные варианты отпечатков инденторов и других контро-тел после испытаний

Воздействие нагружающим телом производится в месте стыка составного образца, определяемого, например, отсчётом от фиксированных плоскостей, в частности, от контура фиксации образца и/или отслеживанием места стыка по стороне образца противоположной стороне с нанесённым покрытием.

На рис.3 приведён пример использования предлагаемого технического решения, где удовлетворительно фиксируется зона деформации образца под нанесённым слоем.

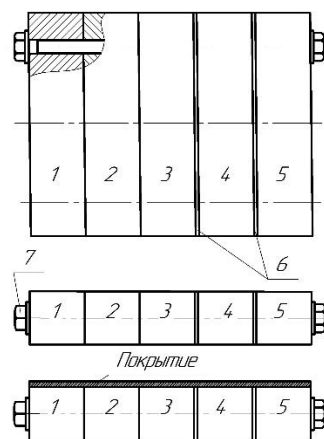


Рис.2. Составной образец, собранный из элементов 1 – 5 посредством болтовых соединений 7, между элементами 3-4-5 установлены контрольные вставки 6

Образцы для испытаний были изготовлены из стали 40 ГОСТ 1050, упрочнённой на твёрдость HRC40.

Для сравнительных испытаний применяли образцы с защитными покрытиями, которые напыляли с помощью плазматрона «ПНК-50», выполненным по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой и оснащённым узлом кольцевого ввода с газодинамической фокусировкой порошковых материалов. Износостойкие сплавы для плазменного напыления покрытий выбраны на основании предварительных исследований [6 - 8]:

– Никель-титановый порошковый сплав для напыления ПВ-ПН55Т45 - порошок на никелевой основе с титаном (Ti - 45%, С - 0,07%, Ni - остальное).

– Никель-алюминиевый порошковый сплав ПВ-Н85Ю15 (Ni – 85%, Al – 15%) - восстановленный иррегулярной форма частиц, фракция – 40-100 мкм.

– Износостойкий самофлюсующийся порошковый сплав ПР-НХ16СР3 ГОСТ 21448-75 системы Ni-Cr-B-Si-C (Cr - 14-18%, B - 2,8-3,8%, Si - 3,0-4,5%, Fe до 5% С - 0,6-1,0% Ni - остальное).

Толщина покрытий составила 0,5-0,6.

В качестве критериев эффективности защитных свойств покрытия использованы следующие параметры:

- Глубина лунки в основном металле после индентирования – h .
- Глубина характерной зоны пластической деформации – h_1 .
- Глубина характерной зоны пластической деформации h_2 .
- Изменение наружного вида реперных отпечатков и расстояний между ними.

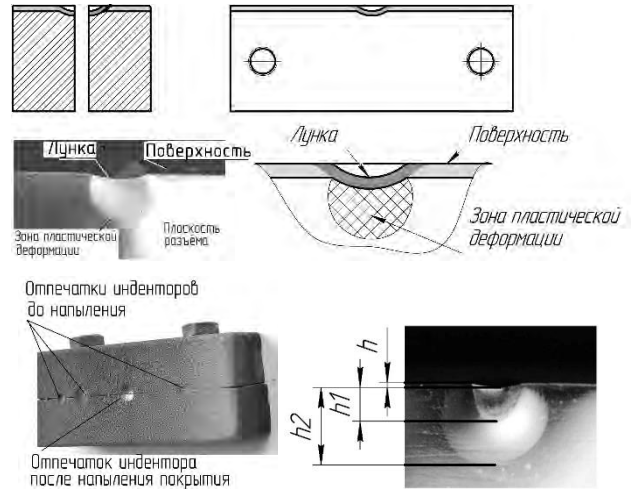
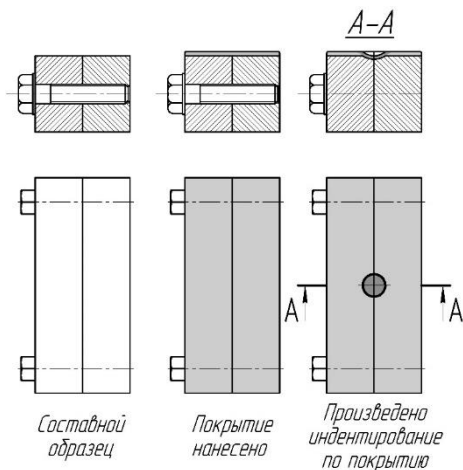
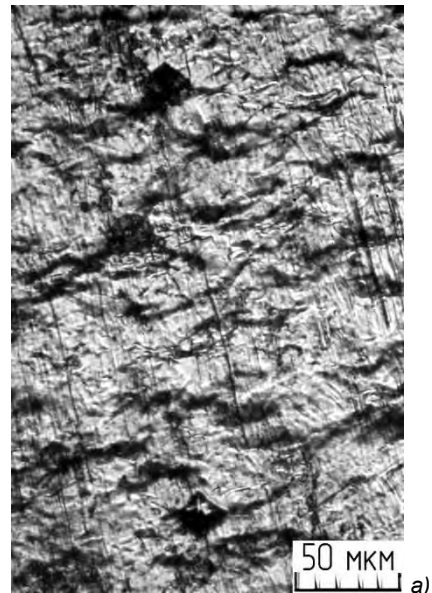


Рис. 3. Схема монтажа образца, испытания и характерный вид поверхности разъёма составных элементов после индентирования

Зона глубины h_1 идентифицируется по рельефу на поверхности разъёма составных образцов (смотри рис. 3), а также по структуре стали, которая имеет микрорельеф поверхности в виде линий сдвига, проходящих по всей площади поверхности (рис. 4б) и ступенек по границам зёрен, образовавшихся в результате зернограничного сдвига.

В зоне пластической деформации глубины h_2 линии сдвига наблюдаются только в ферритных зёрнах, причём ориентация этих линий зависит от ориентации зерна по отношению к направлению деформирующего усилия (рис. 4а).



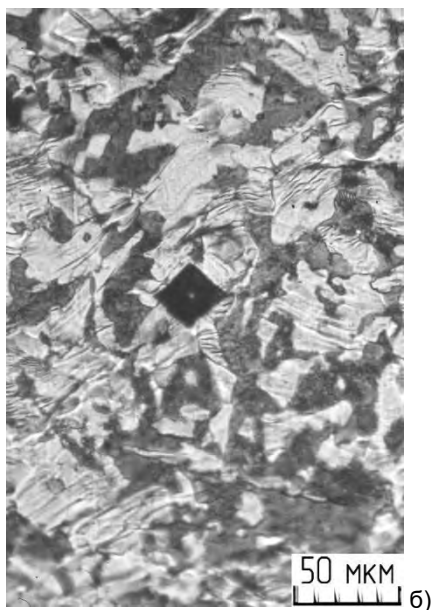


Рис. 4 Характерный микрорельеф поверхности зон пластической деформации: а - зона глубины h_1 ; б - зоны пластической деформации h_2

Травление структуры поверхности производилось нитратом перед разметкой и сборкой составного образца

Другим критерием оценки степени пластической деформации принято относительное изменение величины диагоналей отпечатков предварительной разметки а и в (рис. 5)

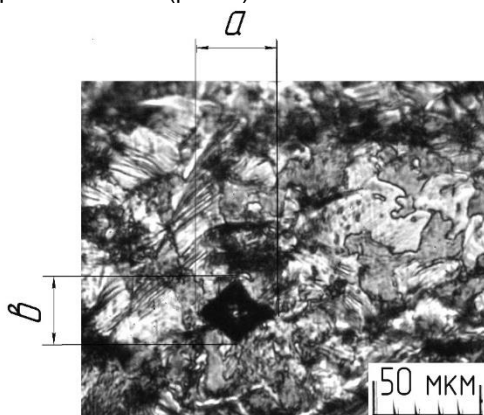


Рис. 5 Вид отпечатка микротвердомера после испытания

Ещё одним критерием пластической деформации является относительное изменение расстояния между соседними отпечатками разметки (рис. 6).

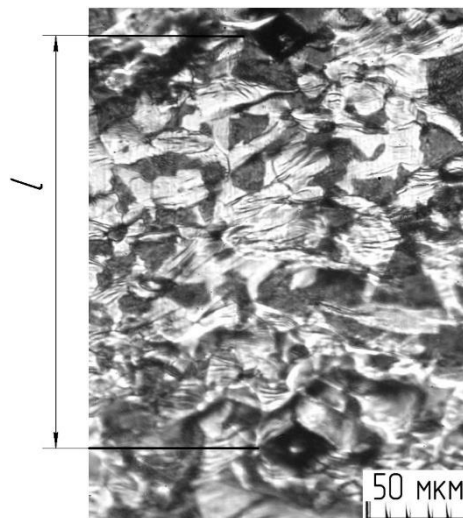


Рис. 6. Оценка степени деформации стали по изменению расстояния между отпечатками пирамиды микротвердомера

Заключение

Предлагаемые варианты устройства и способа позволят вести эксперимент с большей достоверностью результатов при упрощении процедуры, возможностью ведения нескольких вариантов нагружения и использования контактов разных формы в стыках образца, одновременном испытании разных материалов при сокращении расхода наносимого слоя.

Литература

1. Степанов, В.Г., Клестов М.И. Поверхностное упрочнение корпусных конструкций. – Л.: Судостроение, 1977. – 197 с., С.87.
2. Сурьяков, В.А. Метод делительных сеток: методическая разработка. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2003. – 15 с.
3. Экспериментальная механика: в 2-х кн.: Кн.2. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобояси. – М.: Мир, 1990. -552 с.
4. Способ оценки механических свойств металлов при пластическом деформировании : патент Рос. Федерация №2251101 G01N 29/18 (2000.01)/ Кушнаренко В.М., Чирков Ю.А., Самигулов И.Н., Агишев В.Н. ; заявка 2002110486/28 заявл.19.04.2002 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. №12.
5. Метод делительных сеток: URL: <https://poznayka.org/s42749t1> (дата обращения: 24.01.2020).
6. V. KUZMIN, I. GULYAEV, D. SERGACHEV, S. VASCHENKO, E. KORNIENKO, A. TOKAREV. EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES OF AIR-PLASMA SPRAYING OF FUNCTIONAL COATINGS // MATEC WEB OF CONFERENCES 129, 01052 (2017) ICMTMTE 2017.
7. Кузьмин В.И., Каратаев Е.В., Сергачев Д.В., Корниенко Е.Е., Лапушкина Е.Ю., Токарев А.О. Плазменное напыление порошковых покрытий при газодинамической фокусировке дисперсной фазы // Актуальные

проблемы в машиностроении = Actualproblemsinmachinebuilding: Материалы 1 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 26 марта 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. - С. 482-488.

8. *Токарев А.О., Кузьмин В.И., Малыгина Я.К.* Повышение качества металлического порошкового покрытия при плазменном напылении с кольцевой инжекцией порошка // Актуальные проблемы в машиностроении 2016. №3. Ежегодный научно-технический и производственный журнал. - С. 370 - 377.

References

1. *Stepanov V.G., Klestov M.I.* Poverhnostnoe uprochnenie korpusnih konstrukcii [Surface hardening of hull structures]. – L.: Sudostroenie, 1977. – 197 p. – S.87.
2. *Sursyakov V.A.* Metod delitelnih setok_ metodicheskaya razrabotka [Dividing grid method]. – Perm: Permskii gosudarstvennii tehnikeskii universitet_ 2003. – 15 p.
3. *Ekspierimentalnaya mehanik [Experimental mechanics]. v 2-h kn. Kn.2. Per. s angl. / Pod red. A. Koboyasi. – M.: Mir_ 1990. – 552 p.*
4. *Sposob ocenki mehanicheskikh svoistv metallov pri plasticheskom deformirovanii [Method for evaluating the mechanical properties of metals under plastic deformation]: patent Ros. Federaciya №2251101 G01N 29/18 (2000.01) / Kushnarenko V.M., Chirkov Yu.A., Samigulov I.N., Agishev V.N. ; zayavka 2002110486/28 zayavl.19.04.2002 ; opubl. 27.04.2005, Byul. №12.*
5. *Metod delitelnih setok [Dividing grid method]: URL: <https://poznayka.org/s42749t1> (data obrascheniya: 24.01.2020).*
6. *V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev.* Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings // MATEC Web of Conferences 129, 01052 (2017) ICMTMTE 2017.
7. *Kuzmin V.I., Karataev E.V., Sergachev D.V., Kornienko E.E., Lapushkina E.Yu., Tokarev A.O.* Plazmennoe napilenie poroshkovih pokritii pri gazodinamicheskoi fokusirovke dispersnoi fazi [Plasma deposition of powder coatings during gas-dynamic focusing of the dispersed phase] // Aktualnie problemi v mashinostroenii = Actualproblemsinmachinebuilding_ Materiali 1 mejdunar. nauch.-prakt. konf. – Novosibirsk: 26 marta 2014 g. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – pp. 482,488.
8. *Tokarev A.O., Kuzmin V.I., Maligina Ya.K.* Povishenie kachestva metallicheskogo poroshkovogo pokritiya pri plazmennom napilenii s kolcevoi injekciei poroshka [Improving the quality of metal powder coating during plasma spraying with annular powder injection] // Aktualnie problemi v mashinostroenii 2016. №3. Ejegodnii nauchno-tehnicheskii i proizvodstvennii jurnal. – p. 370, 377.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павел Александрович Бимбереков, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: bimberekov@yandex.ru

Александр Олегович Токарев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: aot51@ngs.ru

Екатерина Сергеевна Федотова, аспирант, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ekaterina-lin@mail.ru

Pavel A. Bimberekov, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor of the Department of theory of ship, shipbuilding and technology of materials, Siberian state University of water transport, 630099, Novosibirsk, Schetinkina, 33, Russian Federation, e-mail: bimberekov@yandex.ru

Alexander O. Tokarev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Professor of the Department of theory of ship, shipbuilding and technology of materials, Siberian state University of water transport, 630099, Novosibirsk, Schetinkina, 33, Russian Federation, e-mail: aot51@ngs.ru

Ekaterina S. Fedotova, Graduate student, , Siberian state University of water transport, 630099, Novosibirsk, Schetinkina, 33, Russian Federation, e-mail: ekaterina-lin@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 544.6.076.324.2

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.010

Наноструктурированные материалы на основе диоксида титана в бронзовой модификации для литиевых аккумуляторов в крупногабаритной технике

Д.П. Опра¹, С.В. Гнеденков¹, С.Л. Синебрюхов¹, А.А. Соколов¹, К.П. Опра¹, А.И. Неумоин¹, А.Н. Минаев¹
¹Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. В последние годы, стремительными темпами развивается целый ряд направлений промышленности, таких как гибридный и электрический автотранспорт, подводная робототехника, сфера бесперебойного энергообеспечения, прибрежная возобновляемая энергетика, и т.п., требующих от автономных накопителей энергии работы в жестких условиях эксплуатации. Это диктует необходимость решения ряда задач, связанных с получением для них функциональных материалов с достаточно высокими удельными характеристиками, способностью стабильно и безопасно функционировать в широком температурном диапазоне и в условиях ускоренного заряда. В этой связи все больше внимания исследователями уделяется диоксиду титана. В рамках настоящего исследования получены наноленты диоксида титана со структурой бронз гидротермальным способом с использованием анатаза, состоящего из частиц различного размера. Обнаружено, что степень кристалличности и текстурные характеристики формирующегося TiO₂-B определяются размером частиц и площадью поверхности стартового реагента. В свою очередь оба эти фактора оказывают значительное влияние на электрохимические характеристики бронзовой модификации TiO₂: после 35 циклов заряда/разряда емкость составила 203 мА·ч/г, а скорость деградации – 0,25% за цикл для материала, синтезированного из анатаза с размером частиц ~30 нм и площадью поверхности ~100 м²/г. В то же время образцы, полученные с использованием более крупных частиц, показывают худшие показатели емкости и циклируемости.

Ключевые слова: крупногабаритная техника; энергоустановки; диоксид титана; наноматериал; литий-ионный аккумулятор; анод; мощность; безопасность.

Nanostructured materials based on the bronze titanium dioxide for lithium batteries in large-sized engineering

Denis P. Opra¹, Sergey V. Gnedenkov¹, Sergey L. Sinebryukhov¹, Alexander A. Sokolov¹, Kirill P. Opra¹, Anton I. Neumoyn¹, Alexander N. Minaev¹

¹Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Now, technology progress provides broad prerequisites for practical usage of batteries in the field of hybrid and electric vehicles, marine robotics, backup uninterruptible power supplies, coastal renewable energy sources, etc. with a more hard-working performance. This dictates the necessity of development an advanced electrode materials with a sufficiently high specific parameters, stability of operation and safely in a wide temperature range and under fast charge mode. In this way, a more attention has been paid to titanium dioxide. Herein, the titanium dioxide nanobelts with a bronze structure were obtained by the hydrothermal method using anatase with different particle size as a precursor. It was found that the degree of crystallinity and textural characteristics of as-formed TiO₂-B are determined by the particle size and surface area of starting reagent. Both of these factors have a benefit effect on the electrochemical performance of TiO₂-B: the capacity of 203 mA·h/g was registered after 35 charge/discharge cycles with a degradation of 0.25% per cycle for material synthesized from anatase with a particle size about ~30 nm (~100 m²/g). On the other hand, the samples prepared from a precursors with larger particles show the worst capacity and cyclability.

Key words: large-sized engineering; power systems; titanium dioxide; nanomaterial; lithium-ion battery; anode; power density; safety.

Введение

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов автономного энергоснабжения является электрохимическая технология превращения энергии взаимодействующих в ходе химической реакции веществ в электрическую. Данный способ также позволяет накапливать электрическую энергию от внешних источников за счет ее преобразования в химическую. При этом в данном ключе, литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются передовыми устройствами, которые по совокупности удельных и эксплуатационных показателей превосходят прочие типы химических источников тока. Их удельная энергия в несколько раз превышает энергозапас

свинцово-кислотных аккумуляторов. ЛИА характеризуются наиболее продолжительным сроком службы и низким саморазрядом. В сфере портативной электронной техники, а также в области возобновляемых источников энергии, ЛИА уже вытеснили прочие типы электрохимических систем. При этом спрос на продукты литий-ионной технологии накопления и преобразования энергии продолжает неустанно расти. Так, некоторое время назад ЛИА стали достаточно успешно применять в сегменте гибридного и электроавтотранспорта. А в последние годы литиевые электрохимические системы находят применение в морской технике как в качестве источников резервного и бесперебойного питания на судах различного класса, так и в качестве

силовых энергоустановок для создания тягового усилия.

В России в настоящий момент нет морских судов и роботов, задействующих литий-ионные аккумуляторы. Вместе с тем, переход на передовые технологии крайне важен для отечественного морского транспорта и подводной робототехники. Действительно, энергопотребление морской техники растет из года в год. Становится все труднее обеспечивать ее бесперебойное функционирование за счет устройств из свинцово-кислотных аккумуляторов, применение которых к тому же влечет к уменьшению вместимости и грузоподъемности.

В ЛИА современной конструкции в качестве положительного электрода используются литийсодержащие оксиды переходных металлов (Co, Ni, Mn) или многокомпонентные твердые растворы на их основе. Роль отрицательного электрода исполняет углеродный материал (чаще всего графит). При этом, ввиду физико-химических свойств последнего, такая система накладывает ограничения, связанные с безопасностью, на режим эксплуатации аккумулятора: умеренная токовая нагрузка (не более 1С) и температура не ниже 0 °С. Эти ограничения являются приемлемыми для портативной техники, использующей малогабаритные батареи. С другой стороны, для силовых агрегатов и крупногабаритных модулей резервного питания требуется увеличение показателей производительности ЛИА и расширение температурного диапазона их работы (актуально в том числе и для российского ледокольного флота).

В последние годы в качестве альтернативы графиту значительное внимание привлекает диоксид титана [1-4]. В природе TiO_2 встречается в форме нескольких модификаций, а именно брукита, рутила, анатаза и бронзового полиморфа (TiO_2 -В). Среди них, TiO_2 -В с наименьшей плотностью (3,64 г/см³) и «просторной» в геометрическом смысле упаковке структуры имеет наилучшие перспективы применения в ЛИА [5,6]. Однако скоростные характеристики TiO_2 -В ограничены его низкой электронной проводимостью ($\sim 10^{-12}$ См/см) [7,8].

Известно, что наноструктурирование облегчает перенос носителей заряда. Исходя из этого значительные усилия в последнее время прилагаются для управления морфологией и контроля размера частиц TiO_2 -В. При этом широкое распространение получил гидротермальный способ синтеза, где в качестве прекурсора обычно выступают анатаз или рутил [9-13]. В то же время, технология гидротермального синтеза представляет собой сложный комплексный метод, требующий пристального внимания к целому ряду параметров, таких как: температура, длительность реакции, водородный показатель раствора и морфология прекурсора и др. И несмотря на некоторые работы в данной области [14], на сегодняшний день все еще нет четкой корреляции между параметрами гидротермального синтеза и физико-химическими характеристиками формируемого TiO_2 -В.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния размера частиц прекурсора из анатаза на морфологию, степень кристалличности и электрохимическое поведение TiO_2 -В, полученного в условиях гидротермального синтеза.

Материалы и методы

TiO_2 -В получали посредством гидротермальной обработки 0,1 г анатаза со средним размером частиц ~ 30 нм (~ 100 м²/г), ~ 100 нм (~ 50 м²/г) или ~ 180 нм (~ 20 м²/г) в 15 мл 10 М раствора NaOH при 170 °С в течение 96 ч. Степень заполнения автоклава составляла ≈ 80 %. Ионный обмен Na^+ на H^+ осуществляли в 75 мл 0,05 М раствора HCl в течение 72 ч. Замену раствора соляной кислоты производили каждые 24 ч. Полученный осадок отделяли от раствора центрифугированием, промывали дистиллированной водой до pH = 7 и сушили в течение 10 ч при 80 °С. Кристаллизацию проводили в атмосфере воздуха при 400 °С в течение 3 ч. Образцы обозначены как ТВ-30, ТВ-100, и ТВ-180 в соответствии с размером частиц используемого прекурсора (30, 100 или 180 нм).

Кристаллическую структуру и морфологию синтезированных материалов исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА, дифрактометр Bruker D8-Advance) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, автоэмиссионный микроскоп Hitachi S5500). Удельную площадь поверхности и распределение пор по размерам определяли по изотермам адсорбции/десорбции азота при 77 К (Micrometrics ASAP2020).

Для проведения электрохимических испытаний из синтезированных образцов диоксида титана формировали рабочие электроды по стандартной методике. А именно, связующее на основе поливинилиденфторида (10 мас%), активный материал (80 мас%) и ацетиленовую сажу марки Super P (10 мас%) последовательно добавляли в N-метилпирролидон при постоянном перемешивании. Далее, полученную массу наносили на медную фольгу слоем 2–3 мг/см², подвергали сушке при 60 °С до постоянного веса, подпрессовывали под давлением 1000 кг/см² и термически обрабатывали в вакууме при 110 °С в течение 12 ч. Электрохимические ячейки собирали в осушенном перчаточном боксе в атмосфере аргона (99,999%). Роль противоиэлектрода и электрода сравнения выполнял металлический литий. 1 М раствор LiClO₄ в смеси пропиленкарбоната и диметилкарбоната в объемном соотношении 5:1 служил электролитом. Исследование ячеек проводили с привлечением системы Solartron 1470E в диапазоне напряжений 1–3 В методами гальваностатического заряда/разряда и циклической вольтамперометрии (ЦВ).

Результаты и обсуждение

На рис. 1а представлены рентгеновские дифрактограммы ТВ-30, ТВ-100 и ТВ-180 образцов. Как и ожидалось, на рентгенограммах образцов доминируют дифракционные максимумы моноклинной (пространственная группа $C2/m$) фазы TiO_2 -В (PDF 01-074-1940) с параметрами решетки $a = 12,179$ Å, $b = 3,741$ Å, $c = 6,525$ Å и $\beta = 107,054^\circ$. Вместе с тем, интенсивность рефлексов фонового рассеяния на дифрактограммах говорит о более высоком по сравнению с другими образцами содержании кристаллической фазы в ТВ-30. Последнее свидетельствует о взаимосвязи между размером частиц прекурсора из TiO_2 в фазе анатаза и степенью кристалличности синтезированного TiO_2 -В. Следует отметить, что все образцы содержат

тетрагональную (пространственная группа $I4_1/amd$) фазу анатаза (PDF 00-021-1272), которая, согласно литературным данным [15], неизбежно образуется в виде примеси при синтезе TiO_2-B (в процессе прокаливании протонированного титаната при 350–500 °С). Действительно, РФА дифрактограмма ТВ-30

образца (рис. 1б) после сушки при 80 °С (до термической обработки при 400 °С) характеризуется наличием рефлексов лишь фазы $H_2Ti_3O_7$, что означает полную трансформацию прекурсора из анатаза.

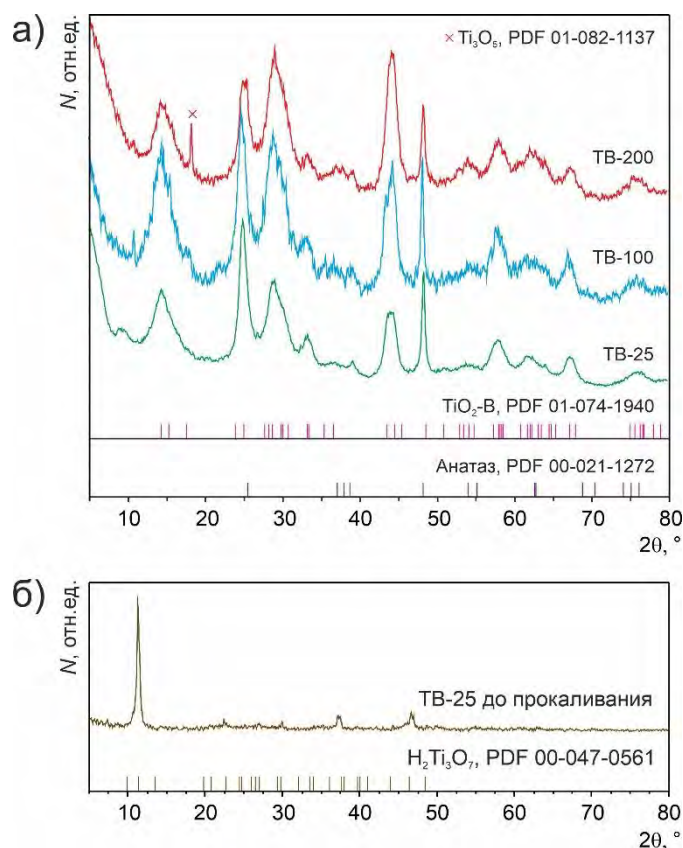


Рис. 1. РФА-дифрактограммы TiO_2-B образцов, полученных посредством гидротермальной обработки анатаза с различным размером частиц (а) и ТВ-30 материала до прокаливания при 400 °С (б)

Рис. 2 показывает морфологию синтезированных в гидротермальных условиях образцов TiO_2-B и прекурсоров из диоксида титана в фазе анатаза с различным увеличением. Как следует из СЭМ-данных, стартовые реагенты (рис. 2.2а) образованы кристаллитами со средним диаметром ~30, ~100, и ~180 нм. Гидротермальная обработка при 170 °С в течение 96 ч приводит к трансформации наночастиц анатаза в ленточные наноструктуры TiO_2-B толщиной 10–15 нм, шириной 50–100 нм, и длиной несколько микрометров (рис. 2б, 2в). Следует отметить, что ТВ-30 и ТВ-100 состоят из более однородных по размеру нанолент по сравнению с ТВ-180. Для более детального изучения поверхности, материалы были исследованы методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота. Согласно результатам, удельная площадь поверхности уменьшалась с ~110 m^2/g (ТВ-30) до ~65 m^2/g (ТВ-100) и ~20 m^2/g (ТВ-180) при увеличении размера кристаллитов прекурсора в диапазоне 30–180 нм. Более того, образец ТВ-30 характеризуется наличием мезопор диаметром 13 нм. Общий удельный объем пор в

материале достиг 0,374 cm^3/g , что является важным для обеспечения высокой эффективности проникновения электролита и улучшения подвижности ионов.

Анализируя наблюдаемую структурно-морфологическую трансформацию с опорой на литературные данные [16,17] можно сделать вывод, что гидротермальная обработка анатаза в среде NaOH вызывает разрыв связей Ti–O–Ti и, как следствие, расслоение структуры с образованием отрицательно заряженных слоев, состоящих из октаэдров TiO_6 . Отсюда, чем меньше размер частиц стартового реагента, тем меньше формирующиеся слои. После этого, ионы Na^+ входят в пространство между слоями, стабилизируя структуру и образуя титанат натрия. В конечном счете, эпитаксиальный рост кристаллов вдоль оси c за счет топохимической реакции приводит к трансформации слоев титаната в наноленты. При этом, в процессе последующего ионообмена, а также прокаливании морфология продукта уже не изменяется.

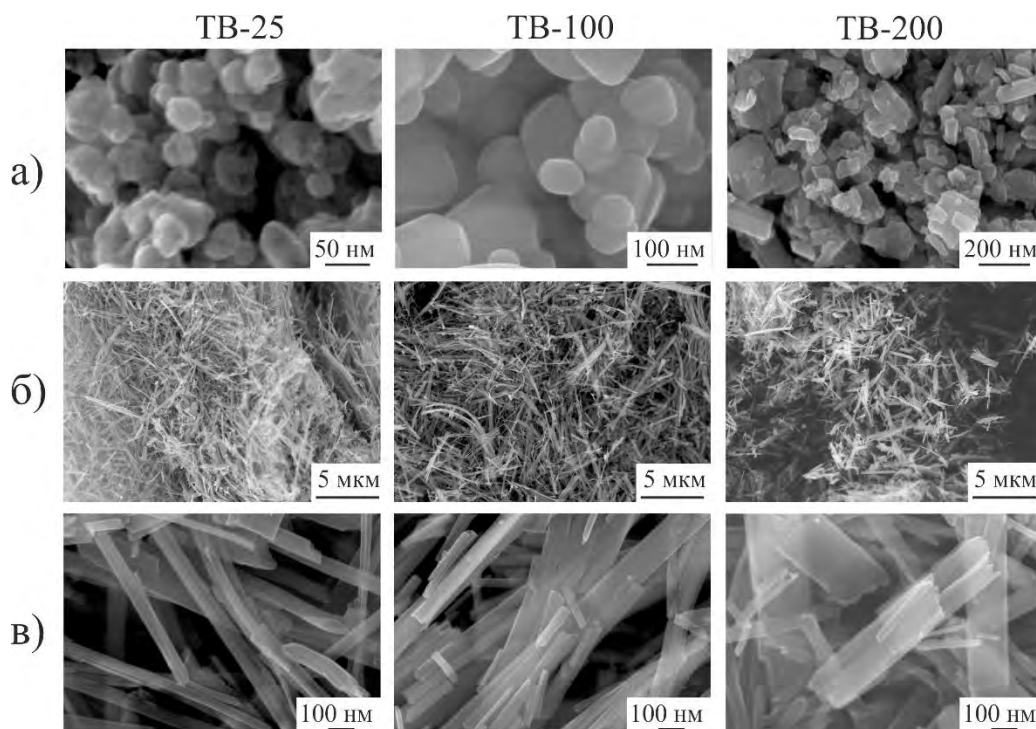
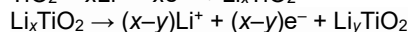
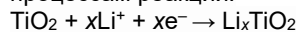


Рис. 2. СЭМ-фото прекурсоров (а) и TB-30, TB-100 и TB-180 образцов при различном увеличении (б, в)

На рис. 3 приведены циклические вольтамперограммы для первых пяти циклов, зарегистрированные на электродах из TB-30, TB-100 и TB-180. Как следует из полученных данных, ЦВ-кривые TB-30 характеризуются наличием двух пар S-пиков при 1,48/1,57 В (S1-пики) и 1,54/1,62 В (S2-пики), отвечающих процессу внедрения и извлечения ионов Li^+ в/из решетку(и) $\text{TiO}_2\text{-B}$ [18]. В то же время, вольтамперограммы TB-100 и TB-180 демонстрируют широкие S-максимумы (без характерного для $\text{TiO}_2\text{-B}$ расщепления), что может быть связано с недостаточной степенью кристалличности образцов. Кроме того, в сравнении с TB-25, их катодные S-пики сдвинуты в сторону низких потенциалов, что, вероятно, указывает на существование аморфной фазы. Присутствие плечевых пиков вблизи 1,72 и 1,94 В (А-пики на рис. 3) связано с участием в токообразующем процессе примеси анатаза [19,20]. Наблюдаемая симметричность S-максимумов в катодной и анодной областях для TB-30 свидетельствует о практически полном извлечении внедренных ионов Li^+ .

Начальные зарядно-разрядные кривые для электродов с активным слоем из нанолент $\text{TiO}_2\text{-B}$, полученные в диапазоне потенциалов 1–3 В при скорости 0,1С приведены на рис. 4а. Форма катодных профилей для всех образцов характерна для внедрения ионов Li^+ в структуру $\text{TiO}_2\text{-B}$, в частности наблюдается пологий участок при 1,5–1,6 В. Внешний вид кривых в анодной области отвечает обратному процессу – извлечению лития из решетки диоксида титана. Соответствующие указанным процессам реакции:



где x и y – коэффициенты внедрения и извлечения лития, варьирующиеся в интервале от 0 до 1 в

зависимости от физико-химических особенностей материала.

Как следует из данных, представленных на рисунке, зарядная и разрядная емкости первого цикла для образца TB-30 достигают 413 и 216 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$, эффективность циклирования составляет 52,4%. В то же время, синтезированные из анатаза с частицами более крупных фракций наноленты $\text{TiO}_2\text{-B}$ (TB-100 и TB-180) продемонстрировали величины удельной емкости, существенно уступающие показателям TB-30. Следует отметить, что первоначальная зарядная емкость TB-30 выше теоретического значения для диоксида титана (335 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$). По-видимому, фиксируемая «экстра-емкость» вызвана разложением электролита на поверхности электрода (в диапазоне 1–1,3 В).

Последующее тестирование (рис. 4б) показывает, что эффективность циклирования TB-30 возрастает до 94,4% после третьего и до 98,7% после пятого цикла с емкостью на уровне 211 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$. После 35-кратного заряда/разряда емкость изучаемого материала все еще составляет около 203 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$, а скорость деградации – 0,25% за цикл. В то же время, образцы TB-100 и TB-180 продемонстрировали значительно меньшую емкость, равную 119 и 105 $\text{mA}\cdot\text{ч/г}$, соответственно, и худшие показатели стабильности. Таким образом, полученные данные отражают прямую зависимость между размером частиц прекурсора и электрохимическим поведением полученного его гидротермальной обработкой $\text{TiO}_2\text{-B}$. Наблюдаемый феномен объясняется более высокой степенью кристалличности и большей удельной площадью TB-30, обеспечивающими его повышенную электрохимическую активность и доступность позиций для внедрения ионов Li^+ .

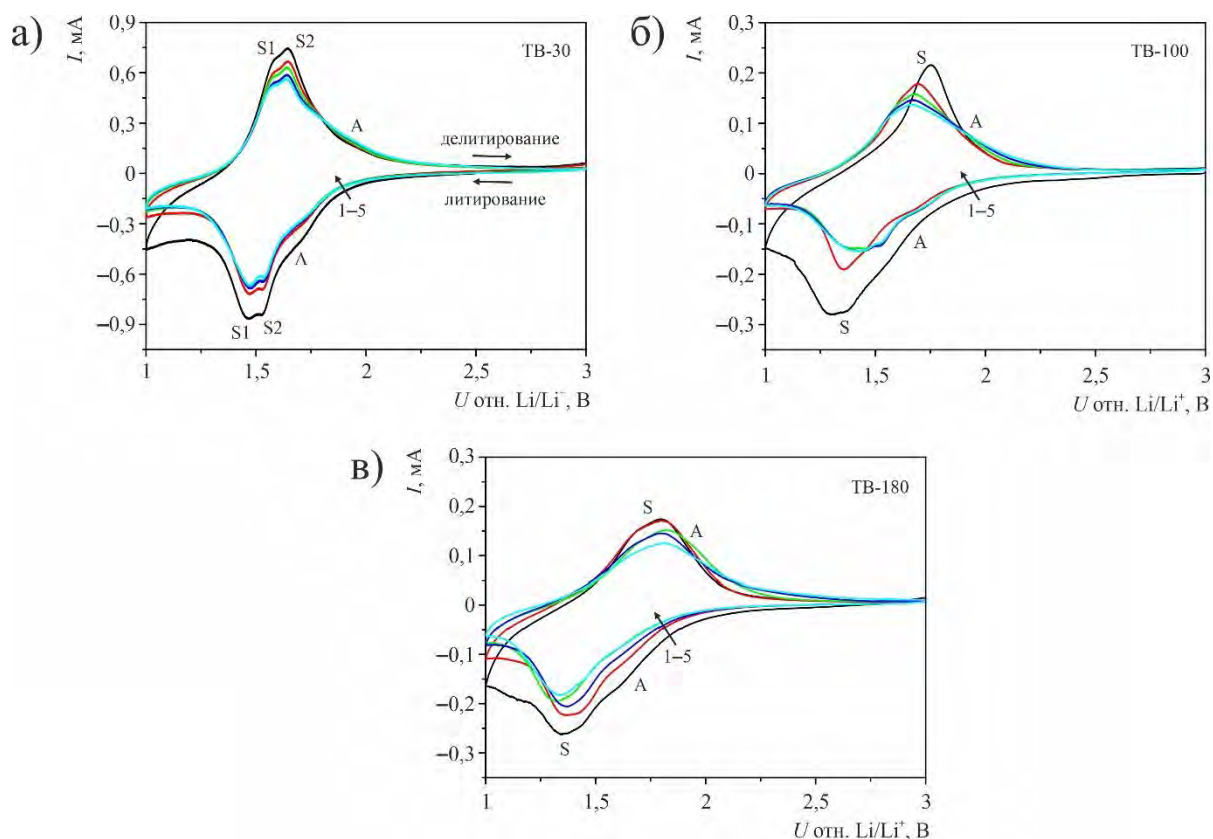


Рис. 3. Циклические вольтамперограммы электродов из образцов TiO_2-B (скорость развертки 100 мкВ/с): TB-30 (а), TB-100 (б) и TB-180 (в)

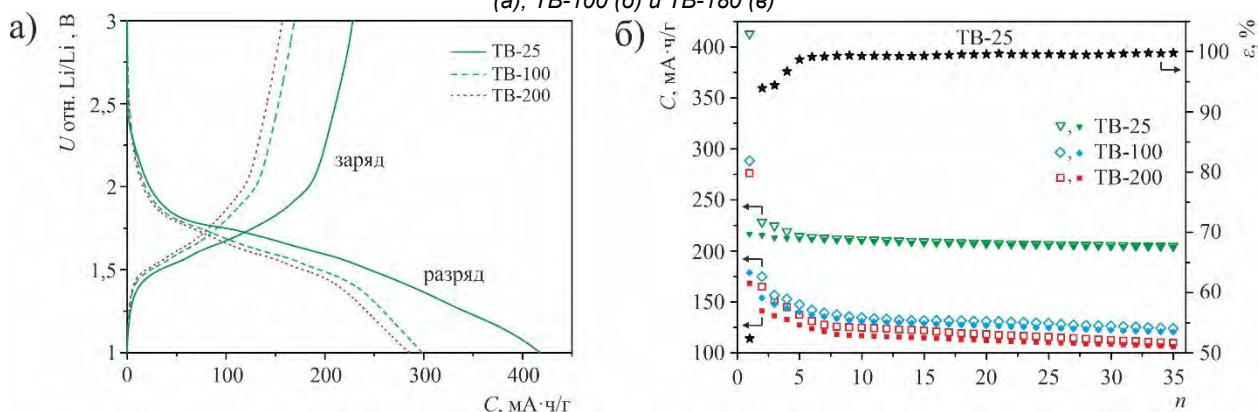


Рис. 4. Профили напряжения первого цикла (а) и результаты 35-кратного циклирования (б) TiO_2-B электродов при плотности тока 33,5 мА/г в диапазоне от 1 до 3 В (процессы внедрения и извлечения Li^+ отмечены, соответственно, пустыми и заполненными символами)

Заключение

TiO_2-B в виде нанолент синтезирован посредством гидротермальной обработки в среде 10 М NaOH прекурсора из анатаза с различным размером частиц и площадью поверхности: ~30 нм и ~100 м²/г, ~100 нм и ~50 м²/г, ~180 нм и ~20 м²/г. Обнаружено, что степень кристалличности TiO_2-B увеличивается с уменьшением размера частиц (увеличением удельной площади поверхности) стартового реагента. Помимо того, от размера частиц прекурсора зависит морфология и текстурные характеристики формируемого TiO_2-B . Так, удельная

площадь поверхности TiO_2-B уменьшается с ~110 до ~20 м²/г с ростом диаметра кристаллитов анатаза от 30 до 180 нм. Эти факторы оказывают значительное влияние на электрохимическое поведение нанолент TiO_2-B в ячейках литий-ионных аккумуляторов. В частности, материал, полученный из наиболее мелкозернистого прекурсора (~30 нм, ~100 м²/г) характеризуется наибольшей, среди всех испытываемых образцов, обратимой емкостью, равной ~200 мА·ч/г после 35 циклов и наилучшей стабильностью при циклировании (падение емкости составило 0,25% за цикл).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-73-10017). Данные рентгенофазового анализа получены на оборудовании ЦКП «ДВЦСИ» (г. Владивосток) (государственное задание № 0205-2021-0004).

This work was carried out with funding from the Russian Science Foundation (grant № 19-73-10017). The XRD studies were collected on the equipment of Core Faculty «FECSEI» (Vladivostok) (state assignment № 0205-2021-0004).

Литература / References

- Zhu X., Yang X., Lv C., Guo S., Li J., Zheng Z., Zhu H., Yang D. New approach to create TiO₂(B)/carbon core/shell nanotubes: Ideal structure for enhanced lithium ion storage. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 8. P. 18815-18821.
- Takami N., Harada Y., Iwasaki T., Hoshina K., Yoshida Y. Micro-size spherical TiO₂(B) secondary particles as anode materials for high-power and long-life lithium-ion batteries. *J. Power Sources*. 2015. V. 273. P. 923-930.
- Wang X., Xie K., Li J., Lai Y., Zhang Z., Liu Y. Synthesis and electrochemical performance of TiO₂-B as anode material. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2011. V. 18. P. 406-410.
- Pang S., Zhao Y., Zhang C., Zhang Q., Gu L., Zhou X., Li G., Cui G. Electrostatic assembly of mesoporous Li₄Ti₅O₁₂/graphene hybrid as high-rate anode materials. *Scripta Mater.* 2013. V. 69. P. 171-174.
- Zukalova M., Kalbac M., Kavan L., Exnar I., Graetzel M. Pseudocapacitive lithium storage in TiO₂(B). *Chem. Mater.* 2005. V. 17. P. 1248-1255.
- Okumura T., Fukutsuka T., Yanagihara A., Orikasa Y., Arai H., Ogumic Z., Uchimoto Y. Electronic and local structural changes with lithium-ion insertion in TiO₂-B: X-ray absorption spectroscopy study. *J. Mater. Chem.* 2011. V. 21. P. 15369-15377.
- Opra D.P., Gnedenkov S.V., Sokolov A.A., Zheleznov V.V., Voit E.I., Sushkov Y.V., Sinebryukhov S.L. Enhancing the reversible capacity of nanostructured TiO₂(anatase) by Zr-doping using a sol-gel template method. *Scripta Mater.* 2015. V. 107. P. 136-139.
- Dylla A.G., Henkelman G., Stevenson K.J. Lithium insertion in nanostructured TiO₂(B) architectures. *Acc. Chem. Res.* 2013. V. 46. P. 1104-1112.
- Qu J., Cloud J.E., Yang Y., Ding J., Yuan N. Synthesis of nanoparticles-deposited double-walled TiO₂-B nanotubes with enhanced performance for lithium-ion batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. V. 6. P. 22199-22208.
- Guo Z., Dong X., Zhou D., Du Y., Wang Y., Xia Y. TiO₂(B) nanofiber bundles as a high performance anode for a Li-ion battery. *RSC Adv.* 2013. V. 3. P. 3352-3358.
- Li J., Wan W., Zhou H., Li J., Xu D. Hydrothermal synthesis of TiO₂(B) nanowires with ultrahigh surface area and their fast charging and discharging properties in Li-ion batteries. *Chem. Commun.* 2011. V. 47. P. 3439-3441.
- Aravindan V., Shubha N., Cheah Y.L., Prasanth R., Chuiling W., Prabhakar R.R., Madhavi S. Extraordinary long-term cycleability of TiO₂-B nanorods as anodes in full-cell assembly with electrospun PVdF-HFP membranes. *J. Mater. Chem. A*. 2013. V. 1. P. 308-316.
- Huang H., Fang J., Xia Y., Tao X., Gan Y., Du J., Zhu W., Zhang W. Construction of sheet-belt hybrid nanostructures from one-dimensional mesoporous TiO₂(B) nanobelts and graphene sheets for advanced lithium-ion batteries. *J. Mater. Chem. A*. 2013. V. 1. P. 2495-2500.
- Liu Z., Andreev Y.G., Armstrong A.R., Brutti S., Ren Y., Bruce P.G. Nanostructured TiO₂(B): the effect of size and shape on anode properties for Li-ion batteries. *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.* 2013. V. 23. P. 235-244.
- Huang H., Yu Z., Zhu W., Gan Y., Xia Y., Tao X., Zhang W. Hierarchically porous nanoflowers from TiO₂-B nanosheets with ultrahigh surface area for advanced lithium-ion batteries. *J. Phys. Chem. Solids*. 2014. V. 75. P. 619-623.
- Li M.-J., Chi Z.-Y., Wu Y.-C. Morphology, chemical composition and phase transformation of hydrothermal derived sodium titanate. *J. Am. Ceram. Soc.* 2012. V. 95. P. 3297-3304.
- Qinghong Z., Lian G., Jing S., Shan Z. Preparation of long TiO₂ nanotubes from ultrafine rutile nanocrystals. *Chem. Lett.* 2002. V. 31. P. 226-227.
- Koudriachova M.V. Role of the surface in Li insertion into nanowires of TiO₂-B. *Surf. Interface Anal.* 2010. V. 42. P. 1330-1332.
- Chen C., Hu X., Hu P., Qiao Y., Qie L., Huang Y. Ionic-liquid-assisted synthesis of self-assembled TiO₂-B nanosheets under microwave irradiation and their enhanced lithium storage properties. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2013. V. 2013. P. 5320-5328.
- Brutti S., Gentili V., Menard H., Scrosati B., Bruce P.G. TiO₂(B) nanotubes as anodes for lithium batteries: Origin and mitigation of irreversible capacity. *Adv. Energy Mater.* 2012. V. 2. P. 322-327.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Денис Павлович Опра, кандидат химических наук, заведующий лабораторией функциональных и электрохимически активных материалов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: dp.opra@ich.dvo.ru

Сергей Васильевич Гнеденков, член-корреспондент, доктор химических наук, профессор, директор, Институт химии Дальневосточного

Denis P. Opra, Ph.D. (Chem), Head of the Laboratory of functional and electrochemically active materials, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: dp.opra@ich.dvo.ru

Sergey V. Gnedenkov, Corresponding member, Dr. Sci. (Chem), Professor, Director, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the

отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: svg21@hotmail.com

Сергей Леонидович Синебрюхов, доктор химических наук, доцент, заместитель директора, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: sls@ich.dvo.ru

Александр Александрович Соколов, младший научный сотрудник лаборатории нестационарных поверхностных процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: alexsokol90@mail.ru

Кирилл Павлович Опра, лаборант-исследователь лаборатории нестационарных поверхностных процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: k-opra@ich.dvo.ru

Антон Иванович Неумоин, аспирант лаборатории функциональных и электрохимически активных материалов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: anton_neumoin@ich.dvo.ru

Александр Николаевич Минаев, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нестационарных поверхностных процессов, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, e-mail: aminaev@mail.ru

Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: svg21@hotmail.com

Sergey L. Sinebryukhov, Dr. Sci. (Chem), Associate professor, Deputy director, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: sls@ich.dvo.ru

Alexander A. Sokolov, Junior researcher of the Laboratory of unstable surface processes, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: alexsokol90@mail.ru

Kirill P. Opra, Research assistant of the Laboratory of unstable surface processes, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: k-opra@ich.dvo.ru

Anton I. Neumoin, Postgraduate of the Laboratory of functional and electrochemically active materials, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: anton_neumoin@ich.dvo.ru

Alexander N. Minaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Chief researcher of the Laboratory of unstable surface processes, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation, e-mail: aminaev@mail.ru

УДК 639.2.081, 519.6, 53.03, 537.8

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.011

Уравнения электродинамического подобия траловых лебедок с электрическим приводом

А.А. Недоступ¹, В.А. Наумов¹, А.О. Ражев¹, С.В. Дятченко¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В данной статье рассмотрены уравнения электродинамического подобия траловых лебедок, имеющих электрический привод с независимым возбуждением. Критериальные уравнения являются важными для определения силовых параметров элементов конструкции траловых лебедок, имеющих различные технические характеристики, что существенно усложняет теоретический анализ при их проектировании и моделировании. Важная составляющая электродинамического подобия состоит в сохранении у модели, выполненной в отличных от натурной размерах, физической природы явлений оригинала. В электродинамических задачах требуется обеспечить подобие механических, электрических и электромагнитных процессов. Необходимо охарактеризовать силовое взаимодействие объекта и среды безразмерными величинами. При проектировании и моделировании траловых лебедок, имеющих электрический привод, недостаточно масштабов физических характеристик гидродинамических, грунтодинамических и трибологических процессов, протекающих с орудиями рыболовства при динамическом подобии, так как они не учитывают электродинамические процессы, протекающие в промысловых механизмах.

Ключевые слова: рыболовное судно, траловая лебедка, электрический привод, уравнение

Electrodynamics similarity equations for trawl winches with electric drive

Alexander A. Nedostup¹, Vladimir A. Naumov¹, Aleksey O. Razhev¹, Sergey V. Dyatchenko¹¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. This article reviews the equations of electrodynamic similarity of trawl winches having an electric drive with independent excitation. The criterion equations are essential for determining the power parameters of structural members for trawl winches, which have different technical attributes, which significantly complicates the theoretical analysis during their design and modeling. An essential component of the electrodynamic similarity is preservation of the physical nature of the original phenomena in a model made in dimensions different from the actual ones. In electrodynamic problems, it is required to ensure the similarity of mechanical, electrical and electromagnetic processes. It is necessary to characterize the force interaction of the object and the environment with dimensionless quantities. When designing and modeling trawl winches with an electric drive, the scale of the physical attributes of hydrodynamic, soil-dynamic and tribological processes occurring with fishery equipment under dynamic similarity is insufficient, since they do not take into account the electrodynamic processes occurring in the fishery machineries.

Keywords: fishing boat, trawl winch, electric drive, equation

Введение

Основной задачей электродинамического подобия траловых лебедок является определение силовых параметров таких деталей как, двигатель, мо-тор, блок, которые нагружены движущимися в водной и воздушной средах орудий рыболовства или их элементов [1]. Траловые лебедки, это механизмы, состоящие из мотора, вала, редуктора и т.д., которые имеют различные технические характеристики. Траловые лебедки имеют различный привод, это электрический и гидравлический. Данный фактор существенно усложняет теоретический анализ при проектировании промысловых механизмов, и их расчет становится невозможным. В данной статье приводятся критериальные уравнения электродинамического подобия ваерной лебедки, имеющей электрический привод (см. рис. 1).

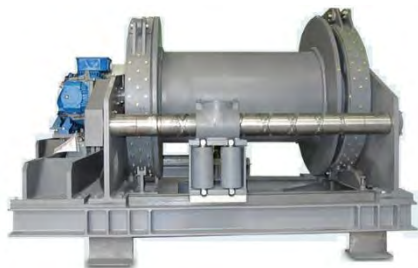


Рис. 1. Вид ваерной лебедки

Электродинамическое подобие как метод исследования проблем потребления энергетики лебедок с электрическим приводом позволяет подобрать необходимые их параметры. Важная составляющая электродинамического подобия состоит в сохранении физической природы явлений оригинала для основных элементов модели, выполненных в отличных размерах от натурных размеров. При исследовании электродинамических задач требуется сохранения геометрического подобия, так же, как и при физическом моделировании в механике, теплотехнике, гидравлике, аэродинамике, при исследовании устойчивости кораблей и т. д. [2].

В электродинамических задачах требуется обеспечить подобие механических, электрических и электромагнитных процессов. Следует отметить, что при электродинамическом подобии лебедок сохраняется физическая природа явлений, тогда, объективно отражаются свойства натурных механизмов.

1. Цель и задачи

Теория электродинамического моделирования процессов, в данном случае, имеет большое значение [3-12]. Необходимо, чтобы параметры модели траловой лебедки были геометрически подобны натурной лебедке, применяемой в промышленном рыболовстве. Однако модель

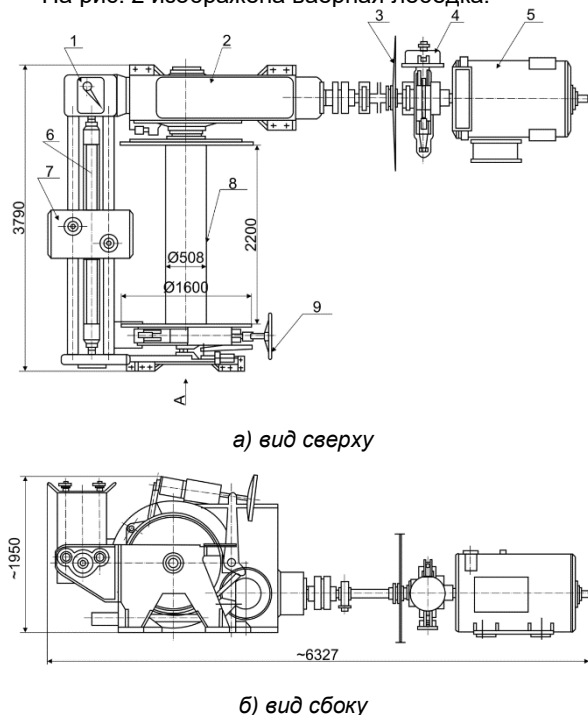
обычно имеет другие размеры, чем натуральный объект, и может испытываться при иных скоростях. Необходимо охарактеризовать силовое взаимодействие объекта и среды безразмерными величинами, которые не имели бы зависимости от абсолютных размеров объекта, скорости его движения или скорости, плотности среды, вязкости жидкости и других размерных величин. В данной статье рассмотрены критериальные уравнения подобия траловых лебедок, имеющих электрический привод.

В данном научном исследовании авторами предпринимается попытка вывести критериальные уравнения электродинамического подобия траловых лебедок, имеющих электрический привод.

2. Материалы и методы

Рассмотрим ваерную лебедку ПНР WTJ12,5 W290Z1 (номер проекта 4-4015/000). Это электрическая лебедка с червячным редуктором, автоматическими ваероукладчиками и ограничением натяжения ваеров при тралении. Ваерная лебедка ПНР WTJ12,5 W290Z1 установлена на судах типа БМРТ проекта В-408 и БАТ пр. 1396 и пр. 1508. Габариты ваерной лебедки 3790 x 6327 x 1950 мм (длина x ширина x высота). Количество барабанов - 1 ваерный. Канатомкость барабана при диаметре ваера $d_v=28$ мм составляет $L_v=4000$ м, а при диаметре ваера $d_v=31$ мм составляет $L_v=3200$ м.

На рис. 2 изображена ваерная лебедка.



а) вид сверху

б) вид сбоку

Рис. 2. Ваерная лебедка ПНР WTJ12,5 W290Z1 (1 - привод ваероукладчика; 2 - червячный редуктор; 3 - муфта; 4 - стопор; 5 - электродвигатель; 6 - винт ваероукладчика; 7 - каретка; 8 - барабан; 9 - тормозное устройство)

Ваерная лебедка ПНР WTJ12,5 W290Z1 (см. рис. 2) потребляет постоянный ток, напряжением 305 В. Тип привода электрический, мощность привода 290 кВт, управление ваерной лебедкой дистанционное. Перегрузочная способность - 1,6. Для управления

ваерной лебедкой применяется теристорный преобразователь. Генератор постоянного тока с помощью реостатов регулирует скорость вращения вала двигателя ваерной лебедки. В режиме торможения он является генератором. Тяговое усилие на среднем витке ваерной лебедки составляет 122,5 кН. Скорость выборки ваеров составляет 1,87 м/с, скорость травления ваеров 3,6 м/с.

Рассмотрим системы уравнений работы электродвигателя постоянного тока, натяжения в ваере, а также намотки ваера на барабан лебедки. Одним из основных электромеханических преобразователей энергии в регулируемом электрическом приводе является двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).

При составлении математической модели ДПТ НВ примем следующие допущения. Считаем, что реакция якоря полностью скомпенсирована (в реальном ДПТ всегда есть компенсационная обмотка либо добавочные полюса), поток возбуждения постоянен, а активное сопротивление якорной цепи не изменяется во время работы двигателя. Уравнение состояния преобразователя не рассматриваем в нашем случае.

Исходные уравнения динамики электромеханической системы (ЭД постоянного тока) [6]:

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = c \cdot I - M_c \quad (1)$$

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U_d - c \cdot \Omega - I \cdot R$$

при начальных условиях:

$$\Omega(0) = 0 \text{ и } I(0) = 0,$$

где Ω – угловая скорость вращения ротора ЭД; I , L , R – сила тока, индуктивность, электрическое сопротивление цепи якоря ЭД, соответственно; c – коэффициент ЭДС; U_d – напряжение на якоре ЭД; t – время; J , M_c – момент инерции и момент сопротивления ротора, соответственно.

Чтобы выразить приведенный к ротору электродвигателя момент M_c , используем уравнение движения груза, поднимаемого лебедкой:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = T - mg \cdot (1 - \lambda) - \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 - k \cdot \lambda \cdot m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

где T – сила натяжения каната, m – масса груза, k – коэффициент присоединенных масс, λ – отношение плотности воды к плотности груза, ρ – плотность воды, S – наибольшая площадь поперечного сечения груза, C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления груза, g – ускорение свободного падения. Полагаем, что числа Рейнольдса велики, область сопротивления груза – квадратичная, поэтому $C_x = \text{const}$.

Момент в формуле (1):

$$M_c = T \cdot r / (p \cdot \eta_M) \quad (3)$$

где r – радиус барабана лебедки, p – передаточное число, η_M – КПД механической передачи.

Если пренебречь растяжением троса, то скорость и ускорение груза в уравнении (2) выражаются через угловую скорость ротора:

$$V = \Omega \cdot \frac{r}{p}, \quad \frac{dV}{dt} = \frac{d\Omega}{dt} \cdot \frac{r}{p} \quad (4)$$

Из (2) выражаем силу натяжения и подставляем в (3)

$$M_c = \frac{r}{p \cdot \eta_M} \left[m \cdot (1 + k \cdot \lambda) \cdot \frac{d\Omega}{dt} \cdot \frac{r}{p} + mg \cdot (1 - \lambda) + \frac{1}{2} C_X \cdot \rho \cdot S \cdot \Omega^2 \cdot \left(\frac{r}{p} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Преобразуем первое из уравнений (1) с помощью (5):

$$J_p \cdot \frac{d\Omega}{dt} = c \cdot I - mg \cdot (1 - \lambda) \cdot \frac{r}{\eta_M p} - \frac{1}{2\eta_M} C_X \cdot \rho \cdot S \cdot \Omega^2 \cdot \left(\frac{r}{p} \right)^3 \quad (6)$$

$$J_p = J + m \cdot (1 + k \cdot \lambda) \cdot \left(\frac{r}{p} \right)^2$$

Введем безразмерные переменные:

$$\omega = \frac{\Omega}{\Omega_0}, \quad i = \frac{I}{I_0}, \quad \tau = \frac{t \cdot U_d}{L \cdot I_0} \quad (7)$$

где Ω_0, I_0 – характерные значения угловой скорости вращения ротора и силы тока, соответственно. В качестве них выберем установившиеся значения указанных переменных.

Выразим из (7) размерные переменные и подставим во второе уравнение (1):

$$\frac{L \cdot I_0 \cdot U_d}{L \cdot I_0} \frac{di}{d\tau} = U_d - c \cdot \Omega_0 \cdot \omega - R \cdot I_0 \cdot i \quad (8)$$

Из (8) следует безразмерная форма дифференциального уравнения силы тока:

$$\frac{di}{d\tau} = 1 - \beta_1 \cdot i - \beta_2 \cdot \omega, \quad i(0) = 0, \quad \beta_1 = \frac{c \cdot \Omega_0}{U_d}, \quad \beta_2 = \frac{R \cdot I_0}{U_d} \quad (9)$$

Аналогичным образом преобразуем первое уравнение (1):

$$\frac{\Omega_0 U_d J_p}{L \cdot I_0} \cdot \frac{d\omega}{d\tau} = c \cdot I_0 \cdot i - mg \cdot (1 - \lambda) \cdot \frac{r}{\eta_M p} - \frac{1}{2\eta_M} C_X \cdot \rho \cdot S \cdot \Omega_0^2 \cdot \left(\frac{r}{p} \right)^3 \cdot \omega^2$$

Откуда безразмерная форма дифференциального уравнения динамики вращательного движения ротора:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \theta_1 \cdot i - \theta_2 \cdot \omega^2 - \theta_0, \quad \omega(0) = 0, \quad \theta_1 = \frac{c \cdot I_0^2 \cdot L}{\Omega_0 U_d J_p} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \frac{mg \cdot (1 - \lambda) \cdot I_0 \cdot L \cdot r}{\Omega_0 U_d J_p \cdot \eta_M p},$$

$$\theta_0 = \frac{C_X \cdot \rho \cdot S \cdot \Omega_0 \cdot I_0 \cdot L}{2\eta_M \cdot U_d J_p} \cdot \left(\frac{r}{p} \right)^3.$$

Уравнения (9)-(10) представляют собой задачу Коши динамики электромеханической системы с двумя степенями свободы (в безразмерной форме). Система уравнений содержит 5 безразмерных комплексов: $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \beta_1, \beta_2$. Покажем, что они не являются независимыми. Для этого рассмотрим установившийся режим работы лебедки, в уравнениях (9) и (10) производные будут равны нулю. Получим систему алгебраических уравнений:

$$\beta_1 \cdot i_0 + \beta_2 \cdot \omega_0 = 1, \quad \theta_1 \cdot i_0 - \theta_2 \cdot \omega_0^2 = \theta_0. \quad (11)$$

Но по условию приведения к безразмерной форме в установившемся режиме

$$I = I_0 \Rightarrow i_0 = 1, \quad \Omega = \Omega_0 \Rightarrow \omega_0 = 1.$$

Тогда из (11) следуют соотношения, связывающие безразмерные комплексы:

$$\beta_1 + \beta_2 = 1, \quad \theta_1 - \theta_2 = \theta_0. \quad (12)$$

Следовательно, из пяти безразмерных комплексов только три являются независимыми. Причем их нельзя выбрать произвольно. По условиям (12), в качестве критериев подобия следует выбрать один комплекс из β_1, β_2 и два комплекса из $\theta_0, \theta_1, \theta_2$. Значения трех выбранных критериев подобия определяются по размерным параметрам конкретной лебедки. Остальные комплексы рассчитываются по формулам (12).

3. Результаты

На рис. 1-2 приведены результаты решения поставленной задачи Коши численным методом при двух заданных значениях критериев подобия ($\beta_1 = 0,5; \theta_1 = 1$) и одном варьируемом критерии подобия θ_0 .

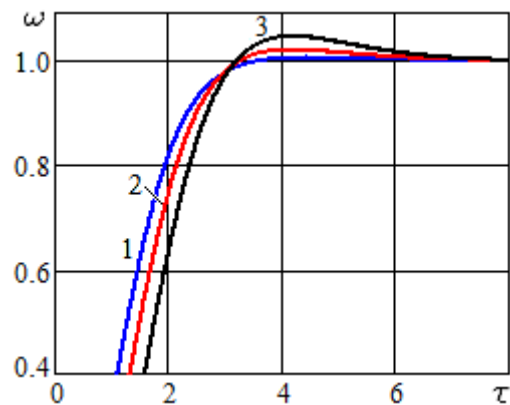


Рис. 1. Изменение безразмерной угловой скорости при разных значениях θ_0 :
1 – $\theta_0 = 0,05$; 2 – $\theta_0 = 0,2$; 3 – $\theta_0 = 0,35$

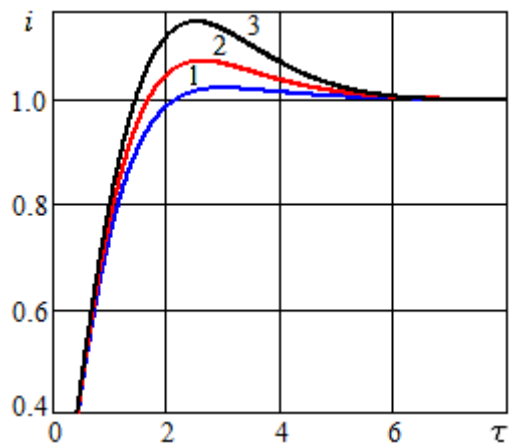


Рис. 2. Изменение безразмерной силы тока при разных значениях θ_0 . Обозначения, как на рис. 1

Выводы

В статье показано, что задача динамики траловых лебедок с электрическим приводом имеет три критерия подобия. Сформулированы правила выбора и определения независимых комплексов по

размерным параметрам лебедки, а также расчетные зависимости для критериев подобия. Показано, как изменение значений критерия подобия влияет на динамику электромеханической системы. Авторами статьи планируется дальнейшая проработка предложенной математической модели.

Благодарности

Научное исследование и публикация статьи выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

Литература

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. К теории электродинамического подобия промысловых механизмов. Известия КГТУ. №56. - 2020. - С. 61-70.
2. Недоступ, А.А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. Томск. - №. 3(19). - 2012. - С. 55-67.
3. Глазырин А.С. Математическое моделирование электромеханических систем. Аналитические методы: учебное пособие / А.С. Глазырин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. - 216 с.
4. Фесенко, В.И. Электрические приводы промысловых судов [Текст] : учебник / В.И. Фесенко. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 224 с.
5. Фираго, Б.И. Теория электропривода : учебное пособие [Текст] / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. - 585 с.
6. Гуляев И.В. Обобщенная электромеханическая система [Текст] / И.В. Гуляев. - Саранск: Изд-во Средневолж. мат. о-ва, 2004. Препринт № 69 -12 с.
7. Ковчин С.А. Теория электропривода [Текст]: учебник для ВУЗов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. - СПб.: Энергоатомиздат, 1994. - 496 с.
8. Егоров В.Н. Динамика систем электропривода [Текст] / В.Н. Егоров, В.М.Шестаков. -Л.: Энерго-атомиздат, - 1983 . - 216 с.
9. Андриенко Л.А. Оптимальное проектирование электромеханических приводов [Текст] //Динамика систем, механизмов и машин: Тез. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. - Омск, 1999. - С. 92.
10. Богатырева Е.В. Совершенствование методов расчет электромеханического привода с учетом переменности нагружения [Текст] / Е.В. Богатырева, А.В. Ивановская // Журнал «Известия Самарского научного центра РАН». - 2016. - том 18, № 1(2) - С. 218-223.
11. Бойко А.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] : учебное пособие / А.А. Бойко, Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещев. - Одесса: СММЛ, 2008. - 192 с.
12. Рассудов Л.Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов [Текст] / Л.Н. Рассудов, В.Н. Мяздель. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 143 с.

References

1. Nedostup A.A., Razhev A.O. *K teorii elektrodinamicheskogo podobiya promyslovykh mekhanizmov* [To the theory of electrodynamic similarity of trade mechanisms]. Izvestiya KGTU, no. 56, 2020, pp. 61-70.
2. Nedostup A.A. *Fizicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov dvizheniya orudiy rybolovstva* [Physical modeling of hydrodynamic processes of the movement of tools of fishery]. Vestnik tomского gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika. Tomsk, no. 3(19), 2012, pp. 55-67.
3. Glazyrin A.S. *Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem. Analiticheskie metody: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of electromechanical systems. Analytical methods: textbook]. Tomsk, Izd-vo Tomского politekhnicheskogo universiteta, 2009, 216 p.
4. Fesenko V.I. *Elektricheskie privody promyslovykh sudov: uchebnyk* [Electric drives of fishing vessels: textbook]. M., izd. "Pishchevaya promyshlennost", 1973, 224 p.
5. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Teoriya elektroprivoda: uchebnoe posobie* [Theory of electric drive: textbook]. Minsk, izd. "Tekhnoperspektiva", 2007, 585 p.
6. Gulyaev I.V. *Obobshchennaya elektromekhanicheskaya sistema* [Generalized electromechanical system]. Saransk, izd. "Srednevolzh. mat. o-va", 2004, preprint no. 69,12 p.
7. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. *Teoriya elektroprivoda: uchebnyk dlya VUZov* [Theory of electric drive: textbook for universities]. SPb., izd. "Energoatomizdat", 1994, 496 p.
8. Egorov V.N., Shestakov V.M. *Dinamika sistem elektroprivoda* [Dynamics of electric drive systems]. -L., izd. "Energoatomizdat", 1983, 216 p.
9. Andrienko L.A. *Optimal'noe proektirovanie elektromekhanicheskikh privodov* [Optimal design of electromechanical drives]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin: Tez. dokl. 3-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Omsk, 1999, p. 92.
10. Bogatyreva E.V., Ivanovskaya A.V. *Sovershenstvovanie metodov raschet elektromekhanicheskogo privoda s uchetom peremennosti nagruzheniya* [Improvement of methods for calculating an electromechanical drive taking into account load variability]. Zhurnal «Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN», 2016, vol. 18, no. 1(2), pp. 218-223.

11. Boyko A.A., Gerasimyak R.P., Leshchev V.A. *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh sistem: uchebnoe posobie* [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems: textbook]. Odessa, SMIL, 2008, 192 p.
12. Rassudov L.N., Myazdel' V.N. *Elektroprivody s raspredelennymi parametrami mekhanicheskikh elementov* [Electric drives with distributed parameters of mechanical elements]. L., izd. "Energoatomizdat", 1987, 143 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Алексеевич Недоступ, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Владимир Аркадьевич Наумов, доктор технических наук, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: van-old@mail.ru

Алексей Олегович Ражев, соискатель кафедры промышленного рыболовства, младший научный сотрудник, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Сергей Васильевич Дятченко, доктор технических наук, заведующий кафедрой кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

Alexander A. Nedostup, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Vladimir A. Naumov, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department Water Resources and Water Use, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: van-old@mail.ru

Aleksey O. Razhev, Research scholar of the Industrial Commercial Fisheries Department, Junior Researcher, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: progacpp@live.ru

Sergey V. Dyatchenko, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Shipbuilding, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

УДК 621.431.74.016

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.012

Численное определение полей скоростей рабочего тела в камере сгорания судового высокооборотного дизеля

Б.И. Руднев¹, О.В. Повалихина¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Современные тенденции развития судовых дизелей связаны, прежде всего с улучшением их энергетических и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшая из которых – возрастание теплонапряженности деталей, образующих камеру сгорания. Высокие локальные тепловые потоки на поверхностях крышки цилиндра, поршня и втулки являются одной из главных причин, снижающих эксплуатационную надежность форсированных судовых дизелей. Достоверность расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, образующих камеру сгорания, определяется главным образом правильностью задания локальных граничных условий со стороны рабочего тела. Учитывая, что доля конвективного теплового потока в суммарном теплообмене достигает в среднем за рабочий цикл 60 – 70%, становится очевидной актуальность разработки надежных расчетно-теоретических методов определения полей скоростей рабочего тела в камере сгорания судовых дизелей. Целью данной статьи является дальнейшее совершенствование математической модели локального конвективного теплообмена в камере сгорания высокооборотного судового дизеля. Показано, что внешнее течение рабочего тела в камере сгорания может быть описано уравнениями Эйлера. Представлены поля скоростей рабочего тела в функции угла поворота коленчатого вала, полученные численным методом. Приведены изотермы и изобары рабочего тела, позволяющие более глубоко проанализировать физику процесса конвективного теплообмена в камере сгорания судового высокооборотного дизельного двигателя.

Ключевые слова: численный метод, поля скоростей газов, конвективный теплообмен, судовый дизель.

Numerical determination of the velocity fields of the working medium in the combustion chamber of a marine high-speed diesel engine

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina¹¹Far Eastern State Technical University of Fisheries

Abstract. Modern trends in the development of marine diesel engines are associated primarily with the improvement of their energy and environmental characteristics. This gives rise to a number of problems, the most important of which is an increase in the combustion intensity. High local heat fluxes on the surfaces of the cylinder head, piston and liner are one of the main reasons that reduce the operational reliability of boosted marine diesel engines. The reliability of the calculated estimate of the thermal and stress-strain state of parts that form the combustion chamber is mainly determined by the correctness of setting the local boundary conditions from the part of the working medium. Taking into account that the share of convective heat flux in the total heat exchange reaches, on average, 60 - 70% for a working cycle, it becomes obvious the urgency of developing reliable computational and theoretical methods for determining the velocity fields of the working medium in the combustion chamber of marine diesel engines. The purpose of this article is to further improve the mathematical model of local convective heat transfer in the combustion chamber of a high-speed marine diesel engine. It is shown that the external flow of the working medium in the combustion chamber can be described by the Euler equations. The velocity fields of the working medium as a function of the angle of rotation of the crankshaft obtained by the numerical method are shown. Isotherms and isobars of the working medium are given, which allow a more in-depth analysis of the physics of the convective heat transfer process in the combustion chamber of a high-speed marine diesel engine.

Keywords: numerical method, gas velocity fields, convective heat exchange, marine diesel.

Введение

Современные тенденции развития судовых дизелей связаны, прежде всего, с улучшением их энергетических и экологических характеристик. Это обуславливает появление ряда проблем, важнейшая из которых – возрастание теплонапряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Взаимодействие рабочего тела со стенками КС приводит к крайне неравномерному тепловому нагружению ее деталей. Высокие локальные тепловые потоки на поверхностях крышки цилиндра, поршня и втулки являются одной из главных причин, снижающих эксплуатационную надежность форсированных дизельных двигателей, в том числе и судовых. Достоверная расчетная оценка теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей как на стадии проектирования, так и при доводке

конструкций вызывает серьезные трудности. Они обусловлены главным образом правильностью задания локальных граничных условий со стороны рабочего тела. Известно, что доля конвективного теплового потока в суммарном достигает в среднем за рабочий цикл от 60 до 70%. В связи с этим разработка и создание надежных, экспериментально обоснованных расчетно-теоретических методов определения полей скоростей рабочего тела в КС судовых дизелей является весьма актуальной проблемой.

1. Исходная система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и основные положения ее численного решения

Математическая модель (ММ) конвективного теплообмена в КС дизеля, предложенная одним из авторов настоящей статьи [1], предусматривает расчетное определение локальных потоков этого

вида переноса теплоты для поверхностей крышки цилиндра, поршня и втулки в функции угла поворота коленчатого вала (ПКВ). При этом рабочее тело в КС дизеля рассматривается условно состоящим из ядра потока и турбулентного пограничного слоя. Выполненными расчетными оценками установлено, что для высокооборотных дизелей типа 8 ЧН 13/14, 12 ЧН 18/20 и аналогичных им скорость звука в КС лежит в пределах 520 – 880 м/с [1, 2]. В то же время величина скорости рабочего тела в дизелях с КС типа Гессельман, Дейц и им подобных укладывается в диапазон 10 – 60 м/с. Сопоставление последних со скоростью звука показывает, что условие (1) выполняется во всем диапазоне угла ПКВ, при котором передается основная часть теплоты от рабочего тела к стенкам деталей, образующих КС (процессы сгорания и расширения рабочего тела).

$$w < 0.25a \quad (1)$$

где w , a – скорость рабочего тела и звука в КС соответственно.

В механике жидкости и газа [3] показано, что выполнение условия (1) позволяет считать течение рабочего тела во внешнем потоке (вне пограничного слоя) невязким и для его описания использовать уравнение Эйлера. Кроме того, в дизелях с упомянутыми выше типами КС движение в ядре потока можно считать осесимметричным и перейти от трехмерной к двумерной постановке задачи. Область решения двумерной осесимметричной задачи течения рабочего тела в КС с фигурным днищем поршня представлена на рис. 1.

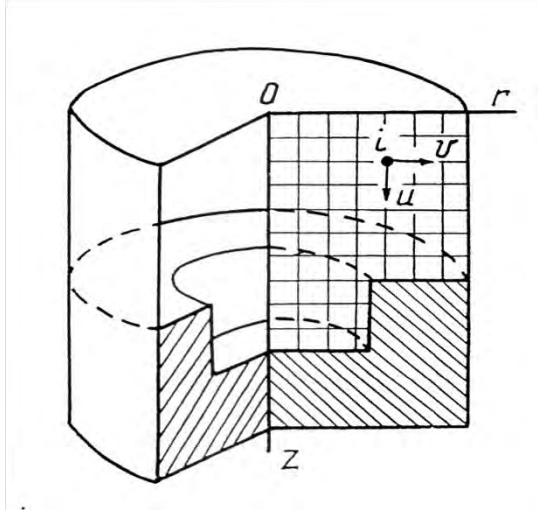


Рис.1. Область решения двумерной осесимметричной задачи течения рабочего тела в КС с фигурным днищем поршня.

При этом система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая фундаментальные законы сохранения энергии, импульса и массы применительно к течению рабочего тела в ядре потока (вне пограничного слоя) в КС дизеля, запишется в цилиндрической системе координат следующим образом:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + P \left(\frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rU)}{\partial r} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial Z} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} \right) = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность рабочего тела в КС; E – внутренняя энергия рабочего тела; u , v – вертикальная (осевая) и радиальная проекция вектора скорости рабочего тела в КС; Z , r – вертикальная (осевая) и радиальная координаты цилиндрической системы.

Уравнения (2) – (5) решались численно на ЭВМ по специально разработанной программе с применением итерационного метода [1] При этом использовались лагранжевы координаты и неявная полностью консервативная разностная схема [4 – 6]. В расчетах условий течения рабочего тела в КС дизеля типа 8 ЧН 13/14 использовались регулярные сетки размером 25×20 для плоской поверхности днища поршня и 30×20 для днища со сложным профилем поверхности. Рассмотрение и численное решение задачи течения рабочего тела в КС с плоским днищем поршня были обусловлены необходимостью выяснения ряда как общих закономерностей, так и особенностей такого течения, а также отработкой алгоритма и программы численного решения уравнений на ЭВМ. В результате были получены поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела в объеме КС при различных углах ПКВ. Для КС со сложным профилем поверхности поршня типа ЦНИДИ, Дейц, ЯМЗ, Гессельман возможно, как показали выполненные на ЭВМ расчеты, использование рекомендаций С. Патанкара [7] о блокировке некоторых расчетных областей регулярной конечно-разностной сетки. Полученные расчетные поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела были затем использованы как входные параметры для расчета локального конвективного теплового потока [8].

Отметим, что расчетная зависимость для локальной плотности конвективного теплового потока построена на локальном соотношении энергии для турбулентного пограничного слоя. Путем преобразований с использованием закона теплообмена, справедливого для обтекания плоской пластины несжимаемым неизотермическим потоком рабочего тела при турбулентном пограничном слое с последующим интегрированием, указанное выше соотношение приводится к уравнению, включающему локальные значения критерия Стентона и других параметров. Полученное локальное значение критерия Стентона в совокупности с локальными значениями скорости, температуры, плотности и теплоемкости рабочего тела однозначно определяют локальную плотность конвективного теплового потока [1, 9].

$$q_k = C_{\rho\infty} \rho_{\infty} W_{\infty} \Delta T^{m+1} C Re_L^{-m/(1+m)} \Psi_T \times \left[\int_0^{\bar{x}} \Psi_T \Delta T^{1+m} d\bar{x} \right]^{-m/(1+m)}, \quad (6)$$

где $C_{p\infty}, \rho_{\infty}, W_{\infty}$ – изобарная теплоемкость, плотность и скорость рабочего тела во внешнем потоке (вне пограничного слоя) в КС; ΔT – температурный напор; C – константа; Re_L – число Рейнольдса, построенное по характерному размеру поверхности (в данном случае по радиусу цилиндра дизеля); Ψ_T – коэффициент, учитывающий влияние неизотермичности на теплоотдачу; \tilde{x} – относительный радиус крышки цилиндра или поршня.

Численное значение коэффициента Ψ_T , константы C и показателя степени m в уравнении (6) выбирались с учетом рекомендаций, содержащихся в [9, 10].

2. Результаты по полям скоростей и другим параметрам рабочего тела в КС дизеля и их обсуждение

Поля скоростей (распределение вектора скорости) и других параметров рабочего тела в КС высокооборотного дизеля типа 8 ЧН 13/14 были получены в результате численного решения дифференциальных уравнений (2) – (5), описывающих основные законы сохранения. Визуализация поля скоростей и других параметров рабочего тела проводилась на ЭВМ с помощью

специальных графических программ Surfer и Grapher фирмы Golden Soft ware inc., Golden, Colorado, USA.

Ранее было указано, что в качестве тестовой для определения поля скоростей рабочего тела в КС являлась задача с плоским днищем поршня. Следует отметить, что численное решение на ЭВМ задачи внешнего течения (вне пограничного слоя) для КС с плоским днищем поршня было выполнено с двумя целями. Первая цель – отработка на ЭВМ соответствующего алгоритма и программы, а также определение с ее помощью основных параметров внешнего течения. Вторая цель – оценка влияния начальных условий на параметры внешнего течения рабочего тела в КС. Отмеченные цели были достигнуты в процессе многовариантных расчетов на ЭВМ.

Анализ полей скоростей, представленных в [2], позволяет сделать вывод о том, что в случае плоского днища поршня движение рабочего тела около его поверхности имеет примерно радиальный характер. Вдоль огневой поверхности крышки цилиндра движение рабочего тела носит четко выраженный радиальный характер.

Поля скоростей рабочего тела в КС с фигурным днищем поршня, полученные численным методом, для различных углов ПКВ после ВМТ, точки (ВМТ) показаны на рис. 2 и 3.

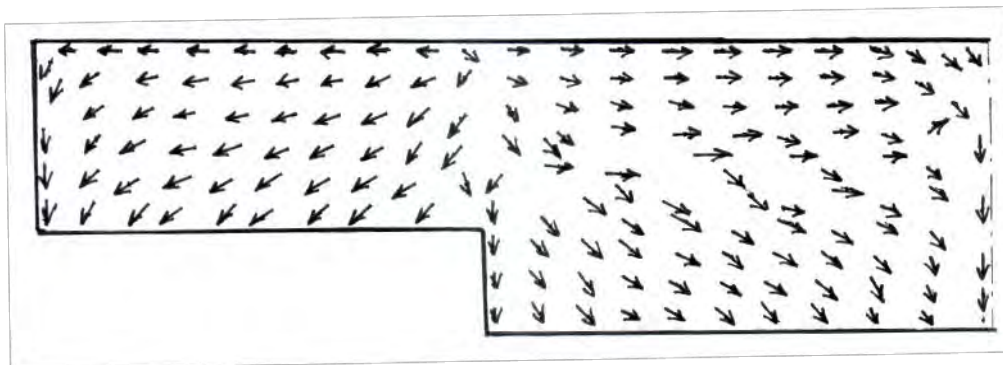


Рис.2. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной плоскости симметрии в КС с фигурным днищем поршня, поршень движется к нижней мертвой точке (НМТ), его положение 15° ПКВ после ВМТ, $P_{me}=0.61$ МПа, $n=1700$ мин $^{-1}$, масштаб вектора скорости 5 мм – 20 м/с

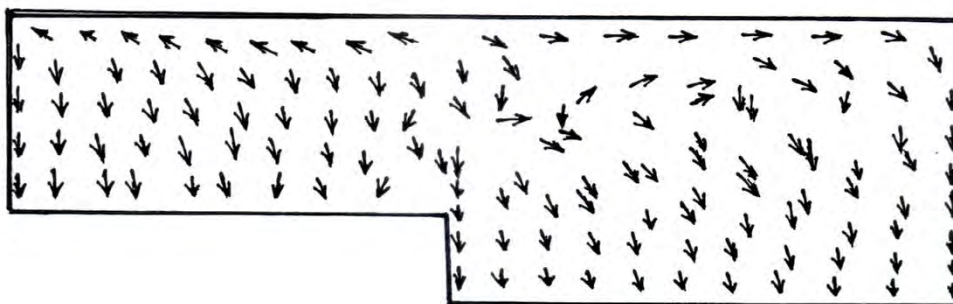


Рис.3. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной плоскости симметрии в КС с фигурным днищем поршня, поршень движется к НМТ, его положение 20° ПКВ после ВМТ, $P_{me}=0.61$ МПа, $n=1700$ мин $^{-1}$, масштаб вектора скорости 5 мм – 20 м/с

На рис. 2 и 3 ось цилиндра располагается справа, поршень – в нижней части рисунков и движется от ВМТ. Следует отметить, что в этом случае поля

скоростей рабочего тела отличаются от таковых по сравнению с КС, имеющей плоское днище поршня.

Во-первых, принципиально меняется качественная картина течения рабочего тела в

объеме КС. В углублении КС в поршне в районе кромки течение меняет свое направление. При этом в потоке рабочего тела образуются вихревые структуры. Последние, безусловно, должны интенсифицировать процесс теплообмена между рабочим телом и поверхностью днища поршня в районе кромки КС. Это положение полностью подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных специалистами фирмы «Даймлер – Бенц» [11]. Анализ работы [11] приведен ранее в [1], а часть полученных в ней экспериментальных данных – в [8]. Течение рабочего тела около поверхности крышки цилиндра и в этом случае имеет в основном радиальный характер.

Во-вторых, с количественной точки зрения величина локальной скорости рабочего тела в случае с фигурным днищем поршня существенно отличается от таковой, полученной при численном решении на ЭВМ для плоского днища поршня. Причем максимальные скорости рабочего тела наблюдаются в районе кромки КС в поршне и составляют 16 – 28 м/с. Указанные расчетные значения локальных скоростей рабочего тела хорошо согласуются с результатами, выполненными с применением других, отличных от нашей математической моделей [12, 13], а также с экспериментальными данными [14].

На рис. 4 и 5 представлены изобары и изотермы рабочего тела в КС высокооборотного судового дизеля 8 ЧН 13/14, полученные при численном решении уравнений (2) – (5).

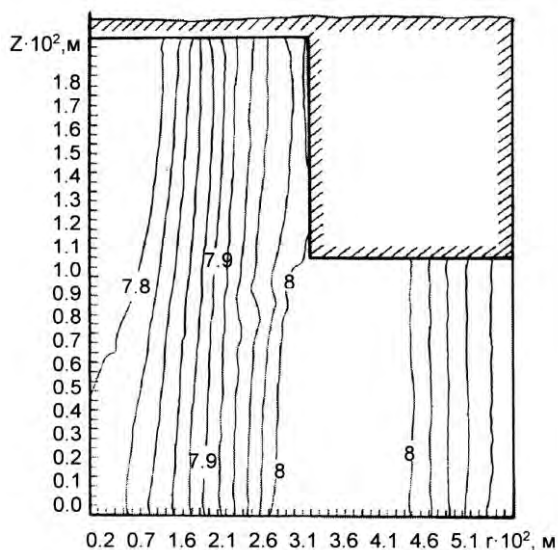


Рис.4. Изобары рабочего тела в вертикальной плоскости симметрии в КС с фигурным днищем поршня: цифры на изобарах указаны значения давления рабочего тела в МПа, положение поршня 10° ПКВ после ВМТ, $P_{me}=0.61$ МПа, $n=1700$ мин $^{-1}$

На указанных рисунках огневое днище крышки цилиндров совпадают с осью абсцисс, поршень движется вверх по оси Z, т.е. от ВМТ к НМТ. Их

анализ показывает, что градиенты давления и температуры, возникающие в рабочем теле по объему КС не столь значительны. Последние и определяют умеренные величины локальных скоростей рабочего тела в КС. Отметим также, что уравнениями (2) – (5) описывается процесс только конвективного теплообмена, так как уравнение энергии не содержит параметра, учитывающего перенос теплоты излучением.

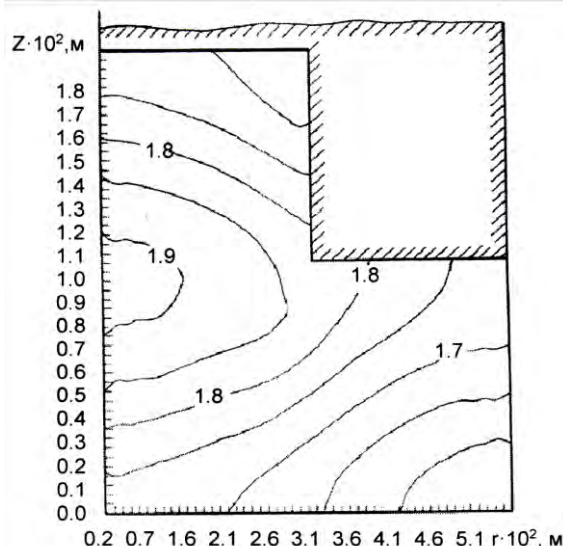


Рис.5. Изотермы рабочего тела в вертикальной плоскости симметрии в КС с фигурным днищем поршня: цифры на изотермах указаны значения температуры рабочего тела в тысячах градусах Кельвина, положение поршня 10° ПКВ после ВМТ, $P_{me}=0.61$ МПа, $n=1700$ мин $^{-1}$

Заключение

Представленный в статье подход, основанный на описании движения рабочего тела во внешнем потоке (вне пограничного слоя) с помощью фундаментальных законов сохранения и обоснованное допущение возможности представить уравнения движения в форме Эйлера, позволили получить ряд интересных и важных результатов. В частности, расчетные поля скоростей рабочего тела в качественном и количественном отношении хорошо согласуются с известными экспериментальными данными, расхождения составляет 10 – 15%. Полученные численным методом на ЭВМ изотермы и изобары рабочего тела в камере сгорания высокооборотного судового дизеля дают возможность более глубоко понять физику процесса конвективного теплообмена, оценить влияние формы камеры сгорания и наметить дальнейшие пути совершенствования математической модели этого вида теплопереноса.

Литература

1. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.
2. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Поля скоростей рабочего тела в камере сгорания дизельного двигателя // Научные труды Дальрыбвтуза, 2013, Т.30, С. 105 – 110.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003, 840 с.
4. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988, 544 с.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т.1, М.: Мир, 1991, 504 с.
6. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 512 с.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984, 152 с.
8. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 112 с.
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990, 367 с.
11. Bopp S., Vatisdis C., Whitelaw J.H. In cylinder velocity measurements with a mobile fiber optic LDA system // SAE Techn. Pap. Ser., 1990, №9000055, P. 1 – 12.
12. Bozza F., Cameretti M.C., Tuccillo R. Numerical Simulation of in-cylinder processes and duct flow in a light duty diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines // Journal of Polish CIMAC, Vol. 2, №1, Warsaw, Poland, 1996, P. 51 – 56.
13. Crary B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Causes of calculation instabilities and their countermeasures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid flow in I.C. engines // Mech. Fac. Eng., Hokkaido Univ., 1992, Vol. 18, №3, P. 1 – 13.
14. Ball W.F., Pettifor H.F., Waterhouse C.N.F. Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct-injection diesel combustion chamber // Proc. Int. Conf. Combust. Eng., Oxford, London, 1983, Vol. 1, P. 163 – 174.

References

1. Rudnev B.I. Processy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniâ dizelej [Processes local heat transfer in diesel combustion chamber]. Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
2. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Polâ skorostej rabočego tela v kamere sgoraniâ dizel'nogo dvigatelâ [Fields of velocities of gases in diesel combustion chamber] // Naučnye trudy Dal'rybvтуza, 2013, T.30, S. 105 – 110.
3. Lojčanskij L.G. Mehanika židkosti i gaza [Mechanics of fluid and gas]. M.: Drofa, 2003, 840 s.
4. Ši D. Čislennye metody v zadačah teploobmena [Numerical methods in heat transfer tasks]. M.: Mir, 1988, 544 s.
5. Fletčer K. Vyčislitel'nye metody v dinamike židkостей [Calculation methods in dynamics of fluids]. T.1, M.: Mir, 1991, 504 s.
6. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. Matematičeskie modeli mehaniki i èlektrodinamiki splošnoj srede [Mathematical models of mechanics and electric-dynamics of solid body]. M.: Izd-vo MGTU im. N.È. Baumana, 2008, 512 s.
7. Patankar S. Čislennye metody rešeniâ zadač teploobmena i dinamiki židkosti [Numerical methods of tasks resolution heat transfer and dynamics of fluid]. M.: Ènergoatomizdat, 1984, 152 s.
8. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Processy teploobmena v kamere sgoraniâ dizel'nyh dvigatelej. Èksperiment i matematičeskoe modelirovanie [Processes heat transfer diesel engine combustion chamber. Experiment and mathematical modeling]. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 112 s.
9. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamental of theory heat transfer]. M.: Atomizdat, 1979, 416 s.
10. Kutateladze S.S. Teploperedaçha i gidrodinamičeskoe soprotivlenie: Spravočnoe posobie [Heat transfer and hydrodynamics opposition. Handbook]. M.: Ènergoatomizdat, 1990, 367 s.
11. Bopp S., Vatisdis C., Whitelaw J.H. In cylinder velocity measurements with a mobile fiber optic LDA system // SAE Techn. Pap. Ser., 1990, №9000055, P. 1 – 12.
12. Bozza F., Cameretti M.C., Tuccillo R. Numerical Simulation of in-cylinder processes and duct flow in a light duty diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines // Journal of Polish CIMAC, Vol. 2, №1, Warsaw, Poland, 1996, P. 51 – 56.
13. Crary B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Causes of calculation instabilities and their countermeasures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid flow in I.C. engines // Mech. Fac. Eng., Hokkaido Univ., 1992, Vol. 18, №3, P. 1 – 13.
14. Ball W.F., Pettifor H.F., Waterhouse C.N.F. Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct-injection diesel combustion chamber // Proc. Int. Conf. Combust. Eng., Oxford, London, 1983, Vol. 1, P. 163 – 174.

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

Расчетно-экспериментальное определение параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля

Б.И. Руднев¹, О.В. Повалихина¹

¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. Температура пламени и степень черноты определяют его собственное излучение. Однако оценка указанных параметров на стадии проектирования судовых дизелей представляет собой трудную и еще пока нерешенную проблему. Последнее обуславливается сложностью достоверного математического моделирования процесса сгорания топлива в дизельных двигателях и весьма высокой стоимостью экспериментальных исследований в этой области. Целью данной статьи является разработка расчетно-экспериментального метода определения параметров излучения пламени в камере сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36. Показано, что оценка величины температуры пламени в камере сгорания в функции угла поворота коленчатого вала может быть выполнена по температуре газов, найденной из экспериментальной или расчетной индикаторной диаграммы и специального параметра. Последний определяется на основании зависимости, полученной путем обобщения экспериментальных данных по измерениям температуры пламени на ряде дизельных двигателей. Представлены результаты по температуре пламени для судового дизеля 6 ЧН 24/36, полученные с использованием разработанного расчетно-экспериментального метода. Установлено, что с ростом нагрузки температура пламени возрастает. При этом в диапазоне изменения нагрузки дизеля от 50% до 100% от номинальной мощности увеличение температуры пламени примерно в два раза превышает увеличение температуры газов. Использование полученных результатов для оценки собственных потоков излучения пламени в камере сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36 и сопоставление их с известными экспериментальными данными показало сходимость в пределах 10 – 15%.

Ключевые слова: температура газов, температура пламени, камера сгорания, радиационный теплообмен, судовый дизель.

Computational and experimental determination of flame radiation parameters in the combustion chamber of a marine diesel engine

Boris I. Rudnev¹, Olga V. Povalikhina¹

¹Far Eastern State Technical University of Fisheries

Abstract. The flame temperature and radiating power are determined with its own radiation. However, the assessment of these parameters at the design stage of marine diesel engines is a complicated and still unsolved problem. The latter is due to the complexity of reliable mathematical modeling of the fuel combustion process in diesel engines and the very high cost of experimental research in this area. The purpose of this article is to develop a computational and experimental method for determining the parameters of flame radiation in the combustion chamber of marine diesel engine 6 ChN 24/36. It is shown that the estimation of the value of flame temperature in the combustion chamber as a function of the crankshaft rotation angle can be performed using the gas temperature found from the experimental or calculated indicator diagram and a special parameter. The latter is determined on the basis of the dependence obtained by generalizing experimental data of the flame temperature measurements at a number of diesel engines. The results on the flame temperature for marine diesel engine 6 ChN 24/36, obtained using the developed computational and experimental method, are presented. It has been found that the flame temperature increases with increasing load. At the same time, in the range of diesel load variation from 50% to 100% of the nominal power, an increase in the flame temperature is approximately twice more than an increase in the gas temperature. The use of the results obtained to assess the intrinsic fluxes of flame radiation in the combustion chamber of marine diesel engine 6 ChN 24/36 and their comparison with the known experimental data showed the convergence within 10 - 15%.

Keywords: gas temperature, flame temperature, combustion chamber, radiation heat exchange, marine diesel.

Введение

Собственный поток излучения пламени в камере сгорания (КС) судового дизеля может быть определен по зависимости

$$E_{\text{собв}} = \sigma_0 \varepsilon_v T_v^4, \quad (1)$$

где σ_0 – постоянная Больцмана; ε_v – интегральная степень черноты пламени; T_v – температура пламени.

Основными параметрами, подлежащими определению в (1) являются интегральная степень черноты и температура пламени, как объемного излучателя. Для оценки величины интегральной степени черноты пламени используются подходы, представленные ранее в [1]. Определение температуры пламени на стадии проектирования

судового дизеля возможно, например, с помощью программного комплекса FIRE [2]. Однако, как отмечают сами авторы работы [3] начальные условия для расчетов на ЭВМ приходится задавать на основании экспериментальных данных, если таковые отсутствуют, то на основании нульмерного расчета. При этом давление и температуру рабочего тела в начальный момент времени принимают также по результатам нульмерного расчета рабочего процесса дизеля. Достоверность полученных расчетным путем локальных температур рабочего тела надо подтвердить путем сравнения их с экспериментальными данными по температуре пламени. Как правило, на стадии проектирования судового дизеля таковые отсутствуют.

В связи с отмеченным для первого этапа проектирования авторами статьи предлагается

подход, базирующийся на обобщении экспериментальных данных по температуре пламени. Последние получены при испытании ряда дизельных двигателей, в том числе и судовых типа ЧН 24/36.

1. Оценка параметра, учитывающего превышение температуры пламени над температурой газов в КС

В настоящей статье расчетное определение температуры объемного излучателя (пламени) T_v в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36 основывается на следующих положениях. Еще Л.М. Белинский [4] экспериментально установил, что температура пламени в КС дизельного двигателя существенно превышает температуру газа (рабочего тела), найденную из индикаторной диаграммы. Этот факт в современных исследованиях по теплообмену в дизельных двигателях является общепризнанным [5 – 9]. Превышение температуры пламени T_v над температурой газов T_r количественно можно оценить коэффициентом K_0 по зависимости:

$$K_0 = \frac{T_v}{T_r} \quad (2)$$

Естественно, что поскольку температура газов T_r и температура пламени T_v являются функциями угла поворота коленчатого вала (ПКВ), то и коэффициент K_0 также изменяется по углу ПКВ и зависит от режима работы дизельного двигателя. В работе [10] приведена развернутая формула для коэффициента K_0 , полученная путем обобщения экспериментальных данных по ряду дизельных двигателей различной форсировки, в том и по отсеку 1Ч 24/36. Она имеет следующий вид:

$$K_0 = \frac{T_v}{T_r} = B + A \exp\left(-\left[\frac{2.4}{\varphi_n}(\varphi_i - \varphi_n)^2\right]\right), \quad (3)$$

где T_v и T_r – температура пламени и температура рабочего тела, найденная по индикаторной диаграмме; $B = 1.2\alpha^{0.3}$ – коэффициент, учитывающий величину начального превышения температуры пламени над температурой рабочего тела; $A = 2(P_{mi}/P_{miM})^{0.5} \cdot (C_m/C_{mH})^{0.5}$ – коэффициент, зависящий от типа двигателя и режима работы; $\varphi_n = 5.5\varphi_{2max}(b_e/b_{eM})^{0.333}$ – функция, определяющая продолжительность процесса активного сгорания; φ_{2max} – угол ПКВ дизельного двигателя от начала «видимого» сгорания до момента достижения второго максимума скорости тепловыделения $(dx/dy)_{max2}$ °ПКВ; φ_i – текущий угол ПКВ, отсчитываемый от начала «видимого» сгорания, °ПКВ; P_{mi}, b_e, C_m – соответственно среднее индикаторное давление, цикловая подача топлива, средняя скорость поршня; P_{miM}, b_{eM} – то же самое для режима максимального крутящего момента; C_{mH} – средняя скорость поршня для режима номинальной мощности.

Следует отметить, что значение коэффициента B можно определить и расчетным

путем в соответствии с рекомендациями, предложенными в [11]. Раскрывая значения параметров, входящих в (3), окончательное выражение для коэффициента K_0 можно представить в виде

$$K_0 = 1.2\alpha^{0.3} + 2(P_{mi}/P_{miM})^{0.5} \cdot (C_m/C_{mH})^{0.5} \times \exp\left(-\left[\frac{2.4[\varphi_i - 5.5\varphi_{2max}(b_e/b_{eM})^{0.333}]^2}{5.5\varphi_{2max}(b_e/b_{eM})^{0.333}}\right]\right) \quad (4)$$

Однако применительно к судовому дизелю 6 ЧН 24/36, на котором авторы настоящей статьи проводили экспериментальные исследования, имеются надежные опытные данные по температурам пламени и газов. Последние получены экспериментальным путем на отсеке 1Ч 24/36 при его испытаниях по нагрузочной характеристике. Обработка представленных в [12, 13] опытных данных по температуре пламени T_v и температуре газов T_r позволили получить зависимость коэффициента K_0 в функции угла ПКВ при работе дизеля 6 ЧН 24/36 по нагрузочной характеристике. Указанная зависимость показана на рис. 1.

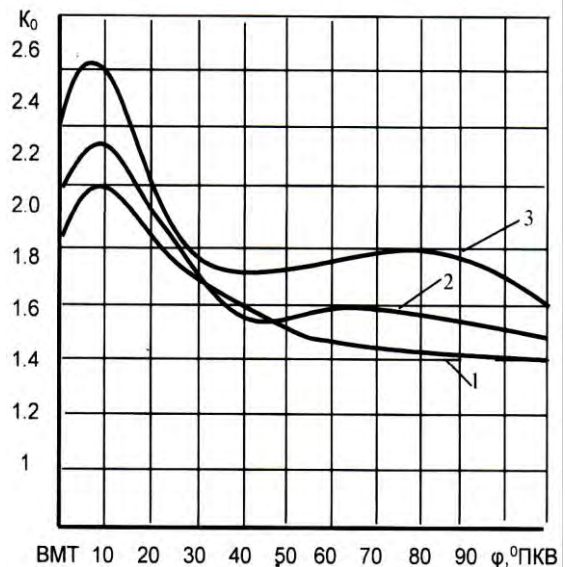


Рис. 1. – Изменение коэффициента K_0 для судового дизеля 6 ЧН 24/36: 1 – нагрузка 50% от $N_{e ном}$; 2 – 75%; 3 – 100%

2. Определение температуры газов и пламени в камере сгорания

Значения температуры газов T_r , определенные в результате обработки экспериментальных индикаторных диаграмм для судового дизеля 6 ЧН 24/36, представлены на рис. 2.

Расчет температуры газов по экспериментальным индикаторным диаграммам производился по зависимости (5), предложенной в [14].

$$T_r = \frac{T_a}{P_{a\varepsilon}} P_r \left(1 + \frac{\varphi^2}{B}\right), \quad (5)$$

где T_a , P_a – температура и давление надвучного воздуха; ε – степень сжатия; P_r – текущее давление газа в КС; φ – текущий угол ПКВ.

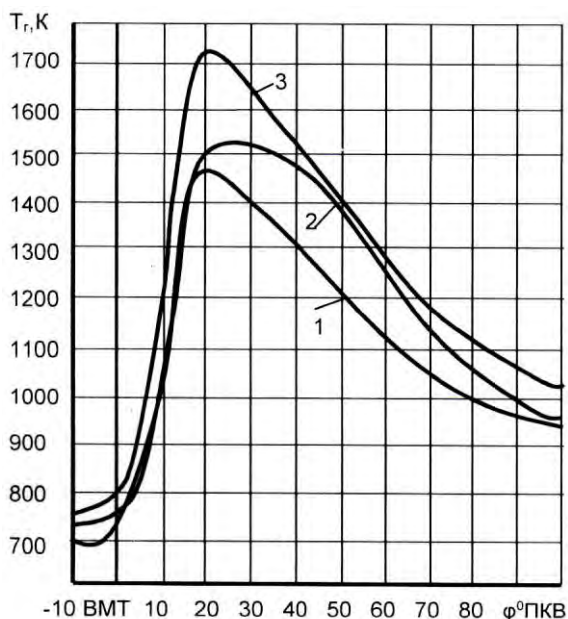


Рис. 2. – Изменение температуры газов в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36: 1 – нагрузка 50% от $N_{eном}$; 2 – 75%; 3 – 100%

Параметр B , входящий в формулу (5), определяется следующим образом

$$B = \left(\frac{360}{\pi} \right)^2 \frac{1}{(\varepsilon - 1)(1 + \lambda)}, \quad (6)$$

где λ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна (для судового дизеля 6 ЧН 24/36 $\lambda = 0,273$).

Располагая экспериментальными данными по температуре газов для судового дизеля 6 ЧН 24/36 (см. рис. 2) и используя ранее найденные значения коэффициента K_0 , представленные на рис. 1, значение температуры пламени в функции угла ПКВ для соответствующего режима работы определяли по зависимости

$$T_v = K_0 T_r. \quad (7)$$

Полученные таким способом температуры пламени показаны на рис. 3.

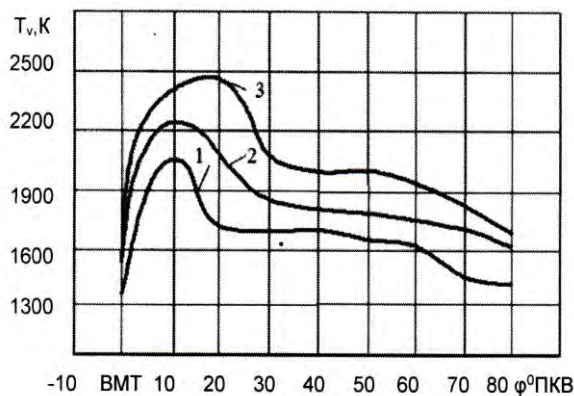


Рис. 3. – Изменение температуры пламени в КС судового дизеля 6 ЧН 24/36: 1 – нагрузка 50% от $N_{eном}$; 2 – 75%; 3 – 100%

Ранее в [1] авторами настоящей статьи предложена методика и приведены расчетные результаты по интегральной степени черноты пламени для судового дизеля 6 ЧН 24/36.

Таким образом все параметры, определяющие собственное излучение пламени: интегральная степень черноты и температура, определены. Приведенные выше значения указанных параметров были затем использованы для определения собственного потока излучения пламени, падающего потока и результирующих потоков излучения, воспринимаемых поверхностями крышки цилиндра, поршня и втулки цилиндра. Расчет этих потоков излучения выполнялся по зависимостям, представленной в [15] зональной математической модели.

Заключение

Предложенный в статье расчетно-экспериментальный подход к определению коэффициента, показывающего превышение температуры пламени над температурой газов и самой температуры пламени, позволил еще на стадии проектирования оценить собственный поток излучения пламени, падающие и результирующие потоки излучения на поверхностях деталей, образующих КС судового дизеля. Сравнение их с известными экспериментальными данными показало сходимость в пределах 10 – 15%, что удовлетворяет требованиям современной практики проектирования и доводки судовых дизелей.

Литература

1. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оценка спектральной оптической толщины пламени в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2020, №1 (47), Т.2, С. 91 – 94.
2. FIRE. User's Manual Version 2009. AVL List GmbH Graz, Austria, 2009, (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2010).
3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А. Трехмерное моделирование нестационарных теплофизических процессов в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 88 с.
4. Белинский Л.М. Теплоизлучение в камере сгорания быстроходного дизеля с воспламенением от сжатия // Труды НИЛД. Л. – М.: Машгиз, 1955, С. 83 – 113.
5. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472 с.
6. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000, 221 с.

7. Cheung C.S., Leung C.W., Leung T.P. Modeling global heat flux in a direct injection diesel engine // Heat Transfer. Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf. Brighton, 1994. Vol.2. P1–RC–2, P. 7 – 12.
8. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a DI diesel // SAE Techn. Pap. Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15.
9. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Proc. 19th Int. Symposium “Heat and mass transfer in gasoline and diesel engine”. Dubrovnik, 1987, P. 439 – 448.
10. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Исследование температуры и излучательной способности турбулентного сажистого пламени в циклических процессах сгорания // Труды ЛПИ, 1977, №358, С. 96 – 100.
11. Лоскутов А.С., Новоселов А.Л., Вагнер В.А. Снижение выбросов окислов азота дизелями в атмосферу // Алтайское краевое правление Союза НИО СССР. Барнаул, 1990, 120 с.
12. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979, 222 с.
13. Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Экспериментальное исследование температуры сажистого пламени четырехтактных дизелей // Межвуз. сб. Исследование рабочего процесса и систем быстроходных дизелей. Барнаул, 1976, Вып. 3(58), С. 17 – 24.
14. Теория двигателей внутреннего сгорания. Руководство к лаб. работам / Под ред. Б.А. Харитонова. Л.: ЛПИ, 1975, 168 с.
15. Израильский Ю.Г., Повалихина О.В., Руднев Б.И. Математическая модель локального радиационного теплообмена в камере сгорания судового дизеля // Морские интеллектуальные технологии, 2016, № 3 (33), Т.1, С. 146 – 151.

References

1. Rudnev B.I., Povalihina O.V. Ocenka spektral'noj optičeskoj toščiny plameni v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Estimation spectral optical thickness of flame in marine diesel combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020, №1 (47), T.2, S. 91 – 94.
2. FIRE. User's Manual Version 2009. AVL List GmbH Graz, Austria, 2009, (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL FIRE between Moscow State Technical Univ. n.a. N.E. Bauman and AVL List GmbH, 2010).
3. Kavtaradze R.Z., Onišenko D.O., Zelencov A.A. Trehmernoe modelirovanie nestacionarnyh teplofizičeskikh processov v poršnevnyh dvigatelâh [Three dimension modeling non-stationary heat-physical of processes in piston of engines] M.: Izd-vo MGTU im. N.Ė. Baumana, 2012, 88 s.
4. Belinkij L.M. Teploizlučenie v kamere sgoraniâ bystrohodnogo dizelâ s vosplameneniem ot sžatiâ [Radiation heat transfer in high speed diesel combustion chamber with inflame from pressure] // Trudy NILD. L. – M.: Mašgiz, 1955, S. 83 – 113.
5. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v poršnevnyh dvigatelâh [Local heat transfer in piston of engines]. M.: Izd-vo MGTU im. N.Ė. Baumana, 2007, 472 s.
6. Rudnev B.I. Processy lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniâ dizelej [Processes local heat transfer in diesel combustion chamber] J. Vladivostok: Dal'nauka, 2000, 221 s.
7. Cheung C.S., Leung C.W., Leung T.P. Modeling global heat flux in a direct injection diesel engine // Heat Transfer. Proc. 10th Int. Heat Transfer Conf. Brighton, 1994. Vol.2. P1–RC–2, P. 7 – 12.
8. Mohammad Sarny I., Borman G.L. Measurement of soot and flame temperature along three directions in the cylinder of a DI diesel // SAE Techn. Pap. Ser., 1991, №910728, P. 1 – 15.
9. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Proc. 19th Int. Symposium “Heat and mass transfer in gasoline and diesel engine”. Dubrovnik, 1987, P. 439 – 448.
10. D'âčenko N.H., Baturin S.A., Ložkin V.N. Issledovanie temperatury i izlučatel'noj sposobnosti turbulentnogo sažistogo plameni v cikličeskikh processah sgoraniâ [Investigation of temperature and radiation of capacity turbulent soot of flame in cycle processes of combustion] // Trudy LPI, 1977, №358, S. 96 – 100.
11. Loskutov A.S., Novoselov A.L., Vagner V.A. Sníženie vybrosov okislov azota dizelâmi v atmosferu [Descent junk azote of oxides of diesel in atmosphere] // Altajskoe kraevoe pravlenie Soúza NIO SSSR. Barnaul, 1990, 120 s.
12. Kostin A.K., Larionov V.V., Mihajlov L.I. Teplonaprâžennost' dvigatelej vnutrennego sgoraniâ. Spravočnoe posobie [Heat-stress of internal combustion engines]. L.: Mašinstroenie, 1979, 222 s.
13. D'âčenko N.H., Baturin S.A., Ložkin V.N. Ėksperimental'noe issledovanie temperatury sažistogo plameni četyrehtaktnyh dizelej [Experimental investigation of soot flame temperature four-tact of diesels] // Mežvuz. sb. Issledovanie rabočego processa i sistem bystrohodnyh dizelej. Barnaul, 1976, Vyp. 3(58), S. 17 – 24.
14. Teoriâ dvigatelej vnutrennego sgoraniâ. Rukovodstvo k lab. Rabotam [Theory of internal combustion engines. Direction from lab. works] / Pod red. B.A. Haritonova. L.: LPI, 1975, 168 s.
15. Izrail'skij Ū.G., Povalihina O.V., Rudnev B.I. Matematičeskaâ model' lokal'nogo radiacionnogo teploobmena v kamere sgoraniâ sudovogo dizelâ [Mathematical model of local radiant heat transfer in marine diesel engine combustion chamber] // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2016, № 3 (33), T.1, S. 146 – 151.

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

УДК 539.1.08; 621.892.84

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.014

Исследование судовых моторных масел методом динамического рассеяния света

Н.Я. Синявский¹, И.П. Корнева², А.М. Иванов¹, Н.А. Кострикова²¹ Калининградский государственный технический университет, ² Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Аннотация. В данной статье исследована возможность использования метода фотонной корреляционной спектроскопии с целью диагностики судовых двигателей по отработанному моторному маслу для повышения экономичности и безопасности эксплуатации морских судов. Необходимость разработки и внедрения новых эффективных методов диагностики судовых дизелей является актуальной задачей.

Целью данной работы явилось исследование ряда свежих и отработанных масел методом динамического рассеяния света для определения изменений, происходящих с маслом в процессе эксплуатации судового дизеля, и выяснения связи этих изменений с неисправностями двигателя. В литературе публикации о подобных исследованиях отсутствуют и результаты, приводимые в настоящей работе, обладают новизной.

При исследовании использовался метод фотонной корреляционной спектроскопии для измерения корреляционных функций и последующего получения распределений времен корреляции, коэффициентов диффузии и размеров частиц. Для инверсии преобразования Лапласа применялся метод, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения и регуляризации (RILT), модифицированный для нахождения распределения времен корреляции.

Установлено, что распределения гидродинамических радиусов частиц для свежих и отработанных масел существенно различаются. По характеру распределений крупных частиц установлено, что в отработанных маслах понижается уровень агрегации или мицеллообразования полимера модификатора вязкости. Показано, что метод динамического рассеяния света позволяет получать параметры, пригодные для анализа состояния моторного масла и для получения диагностических данных о состоянии двигателя по отработанному маслу.

Полученные результаты обладают надежностью, что подтверждается многократной апробацией и общим признанием эффективности метода фотонной корреляционной спектроскопии в разных областях науки. Достоверность полученных результатов подтверждается устойчивостью экспериментов при их многократном повторении, корректностью математической обработки и широкой апробацией используемых методов в мировой практике.

Ключевые слова: судовые моторные масла, диагностика, динамическое рассеяние света

Research of the oils for ship engine by means of dynamic light scattering method

Nikolay Ya. Sinyavsky¹, Irina P. Korneva², Andrey M. Ivanov¹, Natalya A. Kostrikova²¹ Kaliningrad State Technical University, ² Baltic Fishing Fleet State Academy

Abstract. The possibility of using the photon correlation spectroscopy method for the purpose of diagnostics of marine engines based on used engine oil to improve the efficiency and safety of operation of marine vessels is investigated in this article. The need to develop and implement new effective methods of diagnostics of marine diesel engines is an actual task.

The purpose of this work was to study a number of fresh and used oils by dynamic light scattering method to determine the changes that occur with the oil during the operation of a marine diesel engine, and to find out the connection of these changes with engine failures. There are no publications about such studies in the literature, and the results presented in this paper are new.

The photon correlation spectroscopy method was used to measure correlation functions and then obtain distributions of correlation times, diffusion coefficients, and particle sizes. To invert the Laplace transform, we used a method based on minimizing the standard deviation and regularization (RILT), modified to find the correlation time distribution.

It was found that the distributions of hydrodynamic radii of particles for fresh and used oils differ significantly. By the character of the distributions of large particles, it was found that the level of aggregation or micelle formation of the polymer of the viscosity modifier decreases in the used oils. It is shown that the dynamic light scattering method allows to obtain parameters suitable for analyzing the state of engine oil and for obtaining diagnostic data on the state of the engine for used oil.

The results obtained are reliable, which is confirmed by repeated testing and general recognition of the effectiveness of the photon correlation spectroscopy method in various fields of science. The reliability of the results obtained is confirmed by the stability of experiments when repeated many times, the correctness of mathematical processing and wide approbation of the methods used in the world practice.

Keywords: marine engine oils, diagnostics, dynamic light scattering

Введение

Основой движения кораблей, а также судовой энергетики в подавляющем большинстве являются поршневые дизельные двигатели с турбонаддувом. Совершенствование методов диагностики может

способствовать улучшению и росту надежности судовых двигателей, технического обслуживания, экономичности эксплуатации, а также оказывать влияние на безопасную эксплуатацию судов.

Изменения свойств масла и его состава в зависимости от продолжительности работы

двигателя позволяют использовать их для выявления неисправностей. При этом не требуется доставка техники к месту ремонта, демонтаж узлов и агрегатов. Наличие в отработанном масле свинца, олова и железа свидетельствует об износе подшипников скольжения и коленчатого вала. Перегрев двигателя, попадание топлива в масло, наличие в нем абразивных частиц вызывает износ поршней и цилиндров. Износ поршневых колец обнаруживается по наличию в моторном масле хрома и т.д.

Обзору методов и систем мониторинга состояния смазочных масел, диагностики и прогнозирования посвящена работа [1]. Развитие онлайн-анализа судового смазочного масла и развитие интеллектуальных сенсорных систем в диагностике описано в публикации [2].

Широкий спектр методов анализа масла в процессе эксплуатации представлен в справочнике [3]. В статье [4] для диагностирования состояния двигателя предлагается использовать гранулометрический метод, метод ИК – спектроскопии и метод феррографии. В [5] предложена методика контроля состояния дизеля по параметрам моторного масла, измеренным методами инфракрасной спектроскопии и феррографии. В статье [6] рассмотрены возможности спектральных методов диагностики двигателей по отработанному маслу.

Повышению эксплуатационной безопасности судов путем совершенствования методов диагностики судового дизельного двигателя посвящена работа [7]. В этой работе для диагностики систем впрыска дизелей автором использованы характеристики тепловыделения судовых двигателей.

Отработанное моторное масло представляет собой полидисперсную систему, для которой метод фотонной корреляционной спектроскопии позволяет получить распределение эффективных радиусов частиц каждой составляющей и вклад каждой составляющей системы в сигнал рассеяния. По характеру затухания автокорреляционной функции для излучения, рассеянного на частицах примесей в масле, можно определить коэффициенты самодиффузии частиц и рассчитать их гидродинамические радиусы.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Рассеянный свет однододового гелий-неонового лазера измерялся в режиме реального времени с помощью ФЭУ. Для измерения автокорреляционной функции рассеянного света использовался коррелятор *Photocor-FC*. Для управления процессом измерения и обработки результатов измерения использовалось программное обеспечение *Photocor*.

Для полидисперсного раствора корреляционная функция может быть представлена в виде:

$$G(t) = \int_0^{\infty} P(T_d) \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right) dT_d, \quad (1)$$

где T_d – время затухания. Коэффициент диффузии находится, как:

$$D = \frac{1}{T_d q^2}, \quad (2)$$

где вектор рассеяния

$$q = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

θ – угол рассеяния, n – показатель преломления, λ – длина волны излучения.

Если распределение времен затухания T_d известно, то распределение коэффициента диффузии или распределение частиц по размеру можно легко рассчитать с помощью формул (2) и (4). Эффективный радиус частицы определяется по известной формуле, зависящей от температуры, коэффициентов диффузии и вязкости жидкости:

$$R_h = \frac{kT}{6\pi\eta D}, \quad (4)$$

где η – динамическая вязкость.

Для расчета распределения частиц по размерам в отработанном моторном масле из измеренной корреляционной функции мы использовали модифицированную программу RILT. На рис. 1. показан интерфейс этой программы.

Образцами для исследования служили масло ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 12-40, масло М-20Г2СД, синтетическое масло Mobil 5w50 и гидравлическое масло АУП. В качестве растворителей использовались Нефрас– С2-80/120 и жидкий парафин Csl.4. Отработанные масла не прозрачны, поэтому, практически все измерения проводились с растворами. Концентрации растворов: масло АУП свежее в парафине (50%), масло АУП (отработанное 500 час.) в парафине (6.25%), автомобильное отработанное масло Mobil (пробег 10 тыс. км) в парафине (1.6%), отработанное (100 час.) судовое масло М-20Г2СД, судовое (отработанное 300 час.) масло ТПЕО 12-40 в парафине (0.03%).

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис. 2 показаны корреляционные функции для свежего и отработанного масел ТПЕО в растворителях Нефрас и Csl.4 и для самих растворителей. Как видно из рисунка, наибольшее время корреляции для свежего масла ТПЕО и с растворителем и без растворителя Csl.4. Наименьшее время корреляции наблюдается для растворителя Нефрас. Результаты исследования распределения гидродинамических радиусов частиц судового моторного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 12-40 иллюстрирует рис. 3. Видно, что распределения для отработанного и чистого масел отличаются друг от друга. Значения R_h определяются соотношением средних молекулярных масс разных углеводородов, величиной вязкости масла, наличием присадок и модификаторов вязкости, частиц металла, сажи, воды и пр.

Изменения распределения размеров частиц в отработанном масле связано с изменением на молекулярном уровне (термическая полимеризация, окисление, испарение, термический крекинг) и с изменениями, вызванными загрязнениями (образование сажи, попадание воды и воздуха, частиц металла трущихся деталей). По данным работы [10] у отработанного судового масла ТПЕО линии на мультимодальном распределении времен T_2 ЯМР ядер водорода смещаются в область больших времен, что, вероятно, вызвано уменьшением среднего молекулярного веса масла. По результатам ЯМР 1H высокого разрешения молярное содержание функциональных органических групп у отработанного масла ТПЕО

существенно меняется по сравнению со свежим маслом. Кроме этого, с 0.06% до 2.8% увеличивается содержание воды. У отработанного масла по сравнению со свежим маслом увеличивается

содержание ароматических углеводородов, кроме того, за счет окисления нафтеновых и алкановых углеводородов, как правило, меняется средний молекулярный вес масла.

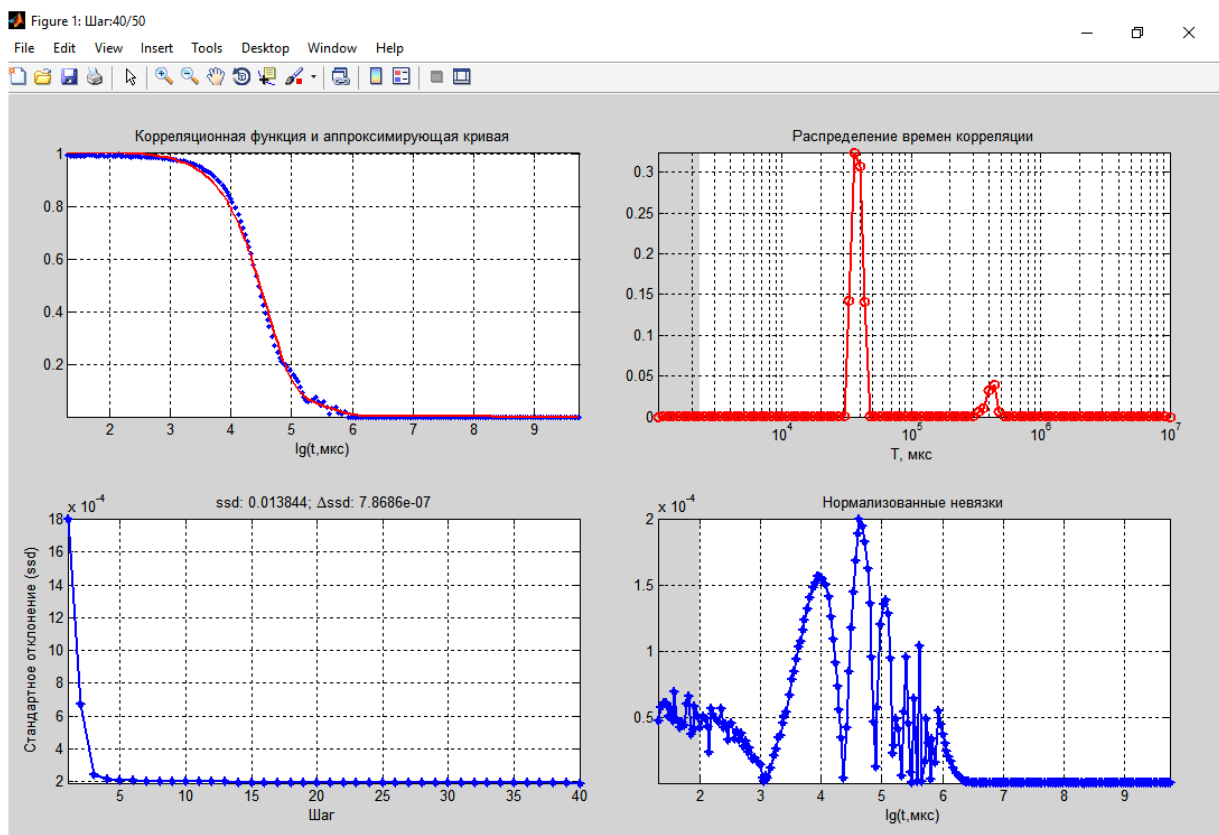


Рис. 1. Интерфейс модифицированной программы RILT.

Анализируя распределения гидродинамических радиусов частиц важно учесть их зависимость от вязкости масел. В процессе эксплуатации масло деградирует и при этом чаще всего его вязкость увеличивается. Причины увеличения вязкости масла: плохое сгорание топливовоздушной смеси, термическая полимеризация масла, окисление, испарение, образование шлама, попадание в масло воды, смешение с воздухом. Вязкость масла может увеличиваться из-за образования растворённого кокса и оксидов, загрязнения сажей. Однако, вязкость масла может и снижаться, это происходит за счет термического крекинга (термического разрушения молекул масла), т.е. процесса противоположного полимеризации. Макромолекулы полимеров могут разрушаться под действием сил сдвиговых деформаций, и это приводит к потере вязкости. И, наконец, вязкость масла падает из-за загрязнения его топливом.

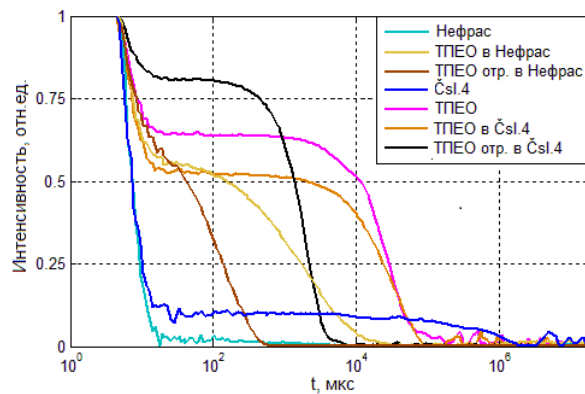


Рис. 2. Корреляционные функции растворителей и масла ТПЕО, свежего и отработанного.

Таблица 1.

Результаты исследования масел и растворителей при t=20 °С.

Вещество	Интенсивность рассеяния I, cps·10 ⁴	Время корреляции τ, мс	Коэффициент диффузии D, см ² /с·10 ⁻¹⁰	Гидродинамический радиус R _h , нм
Масло ТПЕО 12-40 в растворителе Нефрас	18.39	0.2; 2.2; 6.3	1122; 102; 36	50; 380; 1100
Масло ТПЕО 12-40 (отработанное) в растворителе Нефрас	11.31	0.14	1603	23
Масло ТПЕО 12-40	10.39	11; 250	22; 0.9	32; 562
Масло ТПЕО 12-40 (отработанное) в ТПЕО 12-40 свежем	24.61	2.0	112	12
Масло М-20Г2СД в растворителе Csl.4	9.1	12; 250	19; 0.9	25; 562
Масло М-20Г2СД (отработанное) в растворителе Csl.4	26.8	40; 425	5.6; 0.5	79; 794
Масло Mobil 5w50 в растворителе Csl.4	7.1	40; 520	5.6; 0.4	63; 1259
Масло Mobil 5w50 (отработанное) в растворителе Csl.4	23.7	10; 60; 620	22; 3.7; 0.4	25; 158; 1585
Масло АУП чистое в парафине (50%)	4.3	10; 900	22; 0.2	32; 1995
Масло АУП (отработанное 500 ч) в парафине (6.25%)	119.2	25; 200	9; 1.1	63; 398

Средний гидродинамический радиус частиц отработанного масла ТПЕО, как видно из таблицы 1, существенно меньше, чем для свежего масла, причем в обоих растворителях (нефрас и жидкий парафин).

То же самое наблюдается для автомобильного масла Mobil в растворителе Csl.4. А вот для моторного масла М-20 и гидравлического масла АУП все наоборот: в отработанных маслах средний гидродинамический радиус частиц меньше, чем у свежих.

Даже свежее моторное масло - это сложная система многих веществ: базовое масло, содержащее смесь разных углеводородов, модификатор вязкости, присадки (моющие, антикоррозионные и пр.).

даже если их количество большое. Крупные частицы в масле это, как правило, мицеллы полимера модификатора вязкости и пыль.

Как видно из рис. 3 и 4, распределения по размерам для свежих и отработанных масел имеют разные полидисперсности. Характер распределений гидродинамических радиусов частиц в исследованных образцах преимущественно бимодальный. Пики распределений располагаются в двух основных доменах: от 10 нм до 100 нм и выше 100 нм, соответственно. Наличие вязкостно-загущающих присадок в свежих маслах приводит к появлению в маслах крупных частиц (мицелл), а на распределениях гидродинамических радиусов пиков во втором домене. В отработанных маслах эти пики или уменьшаются по величине (масла Mobil, АУП), или исчезают вообще (масло ТПЕО), что соответствует состоянию низкой агрегации или мицеллообразования полимера модификатора вязкости. В отработанных маслах меняется уровень агрегации вязкостно-загущающего полимера (модификатора вязкости).

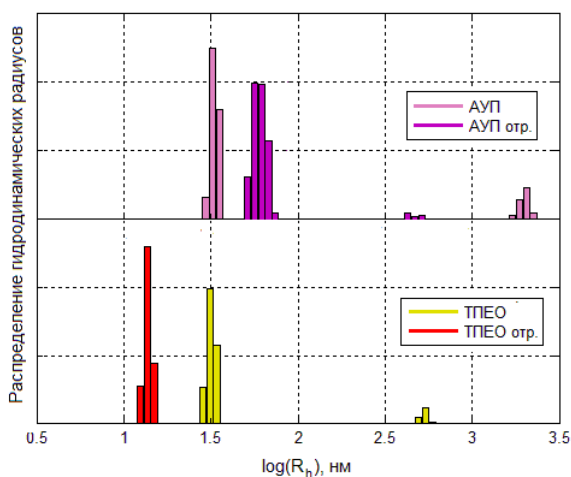


Рис. 3. Распределение гидродинамических радиусов частиц масла ТПЕО и масла АУП.

Крупные частицы сильнее рассеивают свет, и интенсивности связанных с ними пиков на распределениях больше. В результате даже небольшое количество крупных частиц в масле может маскировать обнаружение мелких частиц,

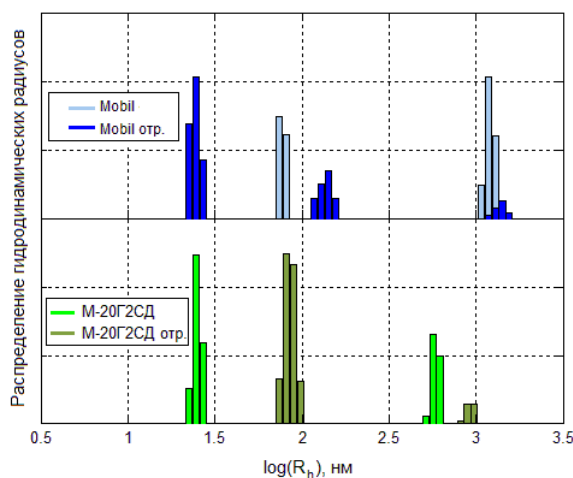


Рис. 4. Распределения гидродинамических радиусов для масла М-20Г2СД и масла Mobil.

Заключение

В работе методом фотонной корреляционной спектроскопии исследованы ряд моторных свежих и отработанных масел, что позволило получить распределения времен корреляции, коэффициентов диффузии и гидродинамических радиусов частиц этих веществ. Проанализированы причины, приводящие к изменениям этих распределений в отработанных маслах. Показано влияние на распределения по размерам частиц вязкости, которая в зависимости от причин (неисправностей двигателя) может меняться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. По характеру распределений крупных частиц установлено, что в отработанных маслах понижается

уровень агрегации или мицеллообразования полимера модификатора вязкости. У отработанного масла по сравнению со свежим маслом увеличивается содержание ароматических углеводородов, кроме того, за счет окисления нафтеновых и алкановых углеводородов, как правило, меняется средний молекулярный вес масла, что проявляется в распределениях коэффициентов диффузии и гидродинамических радиусов.

Результаты выполненного исследования показывают, что метод динамического рассеяния света позволяет получать параметры пригодные для анализа состояния моторного масла и для получения диагностических данных о состоянии двигателя по отработанному маслу.

Литература

1. Zhu J., He D., Bechhoefer E. (2013). Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring. Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Journal of Chemical Science and Technology, 2(3), 100-115
2. Knowles M. and Baglee D. (2012). Condition Management of Marine Lube Oil and the Role of Intelligent Sensor Systems in Diagnostics. IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series, 364, 012007
3. Oil Analysis Handbook for Predictive Equipment Maintenance. https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf
4. Задорожная Е.А., Оводов П.В. (2015). Диагностирование узлов трения тепловых двигателей по результатам анализа смазочного материала. Вестник Оренбургского государственного университета, 179(4), 43-49
5. Берестова Г.И. (2002). Оценка состояния моторных масел в судовых дизелях комплексным методом феррографии и инфракрасной спектроскопии: дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, 178 с.
6. Панков Е.А., Чайка Н.Ф. (2016). Возможности спектральных методов для диагностики авиационных двигателей. Интерэкспо Гео-Сибирь, 9, 8-13
7. Witkowski K. (2017). The Increase of Operational Safety of Ships by Improving Diagnostic Methods for Marine Diesel Engine. TransNav, 11(2), 317-321
8. Синявский Н.Я., Мершиев И.Г., Куприянова Г.С. (2018). Новые подходы к идентификации и оценке качества судовых топлив и масел, Морские интеллектуальные технологии, 42(4), 82-90

References

1. Zhu J., He D., Bechhoefer E. (2013). Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring. Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Journal of Chemical Science and Technology, 2(3), 100-115
2. Knowles M. and Baglee D. (2012). Condition Management of Marine Lube Oil and the Role of Intelligent Sensor Systems in Diagnostics. IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series, 364, 012007
3. Oil Analysis Handbook for Predictive Equipment Maintenance. https://www.spectrosci.com/default/assets/File/SpectroSci_OilAnalysisHandbook_FINAL_2014-08.pdf
4. Zadorozhnaya EA, Ovodov P.V. (2015). Diagnostirovaniye uzlov treniya teplovykh dvigateley po rezul'tatam analiza smazochnogo materiala [Diagnosis of friction units of heat engines according to the results of the analysis of a lubricant]. Bulletin of Orenburg State University, 179(4), 43-49
5. Berestova G.I. (2002). Otsenka sostoyaniya motornykh masel v sudovykh dizelyakh kompleksnym metodom ferrografii i infrakrasnoy spektroskopii [Assessment of the condition of motor oils in marine diesel engines by the integrated method of ferrography and infrared spectroscopy]: Dis. ... cand. tech. sciences. Murmansk, 178 p.
6. Pankov EA, Chaika N.F. (2016). Vozmozhnosti spektral'nykh metodov dlya diagnostiki aviatsionnykh dvigateley [The possibilities of spectral methods for the diagnosis of aircraft engines]. Interexpo Geo-Siberia, 9, 8-13
7. Witkowski K. (2017). The Increase of Operational Safety of Ships by Improving Diagnostic Methods for Marine Diesel Engine. TransNav, 11(2), 317-321
8. Sinyavsky N.Ya., Mershev I.G., Kupriyanova G.S. (2018). Novyye podkhody k identifikatsii i otsenke kachestva sudovykh topliv i masel [New approaches to identification and quality assessment of marine fuels and oils], Marine Intelligent Technologies, 42(4), 82-90

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Яковлевич Синявский, доктор физико-математических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Nikolay Ya. Sinyavsky, Professor, Dr. Sci. (Phys & Math), Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky prospect, 1, e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Ирина Павловна Корнева, кандидат технических наук, профессор, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, г. Калининград, Молодежная, 6, e-mail: zxc127@rambler.ru

Андрей Михайлович Иванов, кандидат физико-математических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: ridlerg@mail.ru

Наталья Анатольевна Кострикова, кандидат физико-математических наук, доцент, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, г. Калининград, Молодежная, 6, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Irina P. Korneva, Ph.D. (Eng), Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, 236029, Kaliningrad, Molodioznaya, 6, e-mail: zxc127@rambler.ru

Andrey M. Ivanov Ph.D. (Phys & Math), Docent, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky prospect, 1, e-mail: ridlerg@mail.ru

Natalya A. Kostrikova, Ph.D. (Phys & Math), Docent, Baltic Fishing Fleet State Academy, 236029, Kaliningrad, Molodioznaya, 6, e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

УДК 621.431.74-44

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.015

Исследование рабочего процесса дизеля при работе на безводном топливе, грубой и микрогетерогенной водотопливной эмульсии

С.П. Андрущенко¹, С.В. Титов¹, Г.С. Юр¹¹Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Оксиды азота являются наиболее опасными химическими соединениями, находящимися в составе отработавших газов судовых дизелей. Уменьшение содержания оксидов азота является весьма сложной задачей, так как это связано с ограничениями максимальной температуры цикла, термического КПД и, следовательно, с ограничениями по топливной экономичности. Одним из эффективных способов уменьшения концентрации оксидов азота является применение водотопливных эмульсий. Недостатком применения эмульсии является увеличение удельного расхода топлива. Целью работы является исследование возможности одновременного снижения уровня вредных выбросов и расхода топлива при работе дизеля на ВТЭ. В статье приведены описание экспериментальной установки и результаты экспериментальных исследований дизеля Ч10,5/12 на безводном топливе, грубой и микрогетерогенной водотопливных эмульсий с содержанием воды 15% при работе по винтовой характеристике. С использованием полученных в ходе испытаний дизеля индикаторных диаграмм выполнен сравнительный анализ рабочего процесса на различных топливах. Полученные результаты выполненных исследований подтвердили эффективность использования микрогетерогенной эмульсии, в сравнении с грубой эмульсией для снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами в судовых дизельных энергетических установках и уменьшения удельного расхода топлива.

Ключевые слова: судовой дизель, грубая и микрогетерогенная водотопливные эмульсии винтовые характеристики, выбросы вредных веществ, расход топлива, индикаторные диаграммы

Investigation of the working process of a diesel engine when operating on anhydrous fuel, coarse and micro-heterogeneous water-fuel emulsion

Sergei P. Andryushchenko¹, Sergei V. Titov¹, Gennadii S. Yur¹¹Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. Nitrogen oxides are the most dangerous chemical compounds which come out with the exhaust gases of marine diesel engines. Reducing nitrogen oxides is challenging due to limitations on maximum cycle temperature, thermal efficiency, and hence fuel economy limitations. One of the effective ways to reduce the concentration of nitrogen oxides is the use of water-fuel emulsions. The disadvantage of using an emulsion is the significant fuel consumption increase.

This article describes the experimental setup and the results of experimental studies of a Ч10.5/12 diesel engine on anhydrous fuel, coarse and micro-heterogeneous water-fuel emulsions with a water content of 15% when operating in service. Performance diagrams obtained during the diesel engine tests let the authors get a comparative analysis of the working process using various fuels. The results confirmed the effectiveness of using a micro-heterogeneous emulsion, in comparison with a coarse emulsion, to reduce emissions of nitrogen oxides with exhaust gases in marine propulsion systems and to reduce fuel consumption.

Keywords: marine diesel engine; coarse and micro-heterogeneous emulsions, performance in service, harmful substances in exhaust gases, fuel consumption, indicator diagrams

Введение

Оксиды азота являются наиболее опасными химическими соединениями, находящимися в составе отработавших газов двигателей с воспламенением от сжатия – дизелей.

В соответствии с Требованиями Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78 на Североамериканском побережье США и Канады, а также на Балтийском море, предусмотрено сокращение выбросов оксидов азота на уровне IMO Tier 3 на 80 % до (2,0-3,5) г/(кВт·ч) [1].

Уменьшение содержания оксидов азота в отработавших газах является весьма сложной задачей, так как это связано с ограничениями максимальной температуры цикла, термического КПД и, следовательно, с ограничениями по топливной экономичности.

Если для вновь проектируемых дизелей генеральным направлением улучшения экологических показателей является разработка

адаптивных двигателей и повышение давления впрыскивания топлива, то для дизелей находящихся в эксплуатации альтернативным решением представляется применение водотопливных эмульсий (ВТЭ) [2, 3].

Эмульсии топлива с водой успешно применяются корпорациями MAN Diesel&Turbo SE (Германия-Дания) и Mitsubishi (Япония) [4].

Одним из способов уменьшения концентрации оксидов азота в отработавших газах при использовании водотопливных эмульсий является уменьшением дисперсности воды в ВТЭ. Однако это связано с одновременным увеличением удельного расхода топлива [3].

Поэтому, научно-исследовательские работы, по использованию водотопливных эмульсий с целью уменьшения выбросов оксидов азота без значительного увеличения расхода топлива, являются актуальными.

Описание экспериментальной установки

Испытания проводились на безводном дизельном дистиллятном топливе ГОСТ 305-2013 «Л» и водотопливной эмульсии на основе этого топлива.

Давление газов в цилиндре дизеля по углу поворота коленчатого вала измерялось стробоскопическим индикатором «ДЕКАРТ» конструкции ФГБОУ ВО «СГУВТ». Для измерения дымности и концентрации газообразных загрязняющих веществ содержащихся в отработавших газах, использовались дымомер «МЕТА-01МП 0.1» и газоанализатор «ЭКСПЕРТ».

Измерение расхода топлива осуществлялось весовым способом с использованием электронных весов типа МК-6,2-A22.

Для получения микрогетерогенной эмульсии была спроектирована и изготовлена специальная опытная установка, описание и принцип работы которой приведены в работе [4].

В качестве эмульгатора использовался мазут 40 в количестве 5% от суммарного объема топлива и воды.

Исследовательские работы велись с соблюдением требований ГОСТ 10448-80, ГОСТ 24028-80, ГОСТ 24545-81, ГОСТ 24060.12-79.

На рис. 1 приведён общий вид испытательного стенда на изготовленного на базе дизеля Д21А.



Рис. 1 – Общий вид экспериментальной установки

Результаты испытаний

На рис. 2 приведены винтовые характеристики при работе на безводном топливе и микрогетерогенной ВТЭ с содержанием воды 15%.

На рис. 3-5 показаны индикаторные диаграммы, полученные на отсеке дизеля при работе на дизельном топливе, грубой и микрогетерогенной эмульсии с содержанием воды 15% на номинальном режиме после их сглаживания.

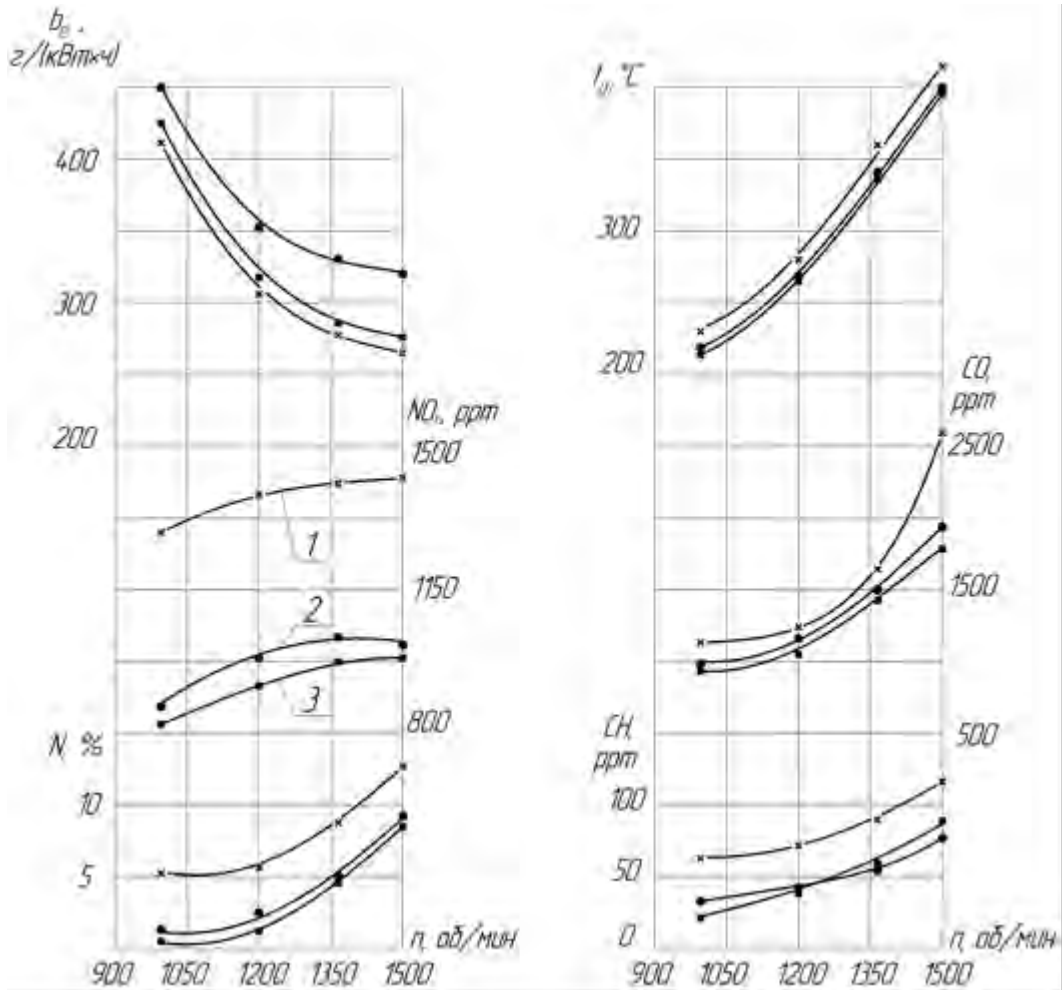


Рис. 2 – Винтовые характеристики дизеля Ч 10,5/12: 1-дизельное топливо; 2-грубая эмульсия 15% воды, $d_w = (10-15)$ мкм; 3-микроразнообразная эмульсия 15% воды, d_w менее 3 мкм; N -дымность отработавших газов по шкале Hartrige, %; NO_x -концентрация оксидов азота, ppm; b_e -удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч); t_g -температура отработавших газов, °С; CO -концентрация оксида углерода, ppm; CH -концентрация углеводородов, ppm

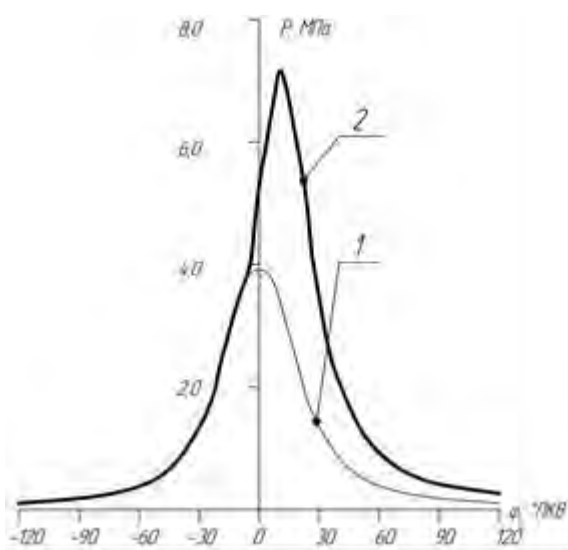


Рис. 3 – Индикаторная диаграмма дизеля Ч10,5/12 при работе на безводном топливе: 1-диаграмма чистого сжатия; 2-диаграмма горения

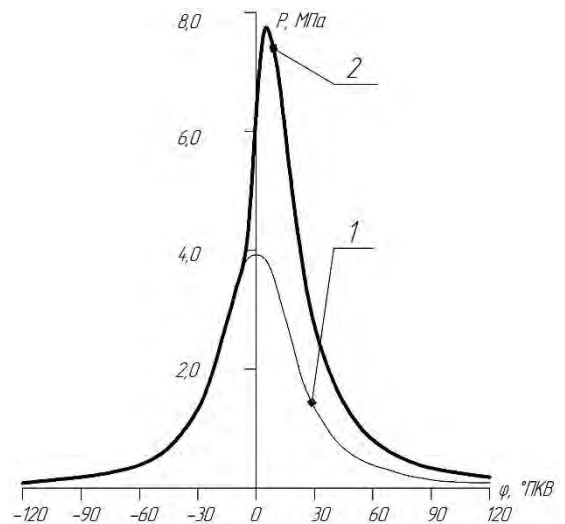


Рис. 4 – Индикаторная диаграмма дизеля Ч10,5/12 при работе на грубой эмульсии: 1-диаграмма чистого сжатия; 2-диаграмма горения

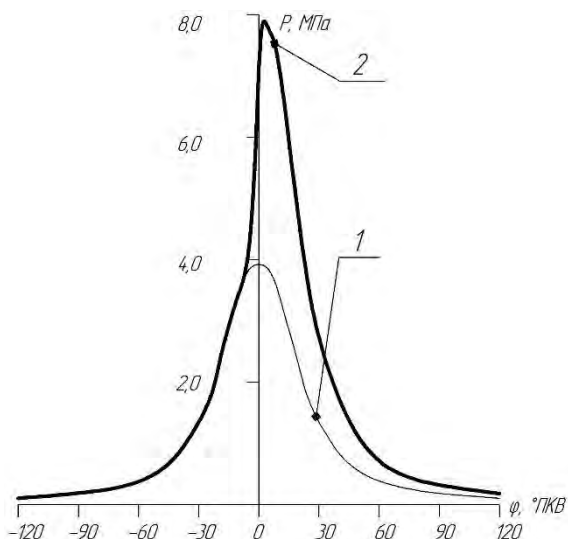


Рис. 5 – Индикаторная диаграмма дизеля Ч10,5/12 при работе на микрогетерогенной эмульсии: 1-диаграмма чистого сжатия; 2-диаграмма горения

В таблице 1 представлены данные, полученные после предварительной обработки индикаторных диаграмм.

По результатам испытаний отмечено, что на номинальном режиме, при переводе дизеля с безводного топлива на грубую эмульсию, концентрация оксидов азота уменьшилась в 1,3 раза, удельный эффективный расход топлива увеличился на 43 г/(кВт·ч). Максимальное давление сгорания повысилось на 0,6 МПа.

При переводе дизеля на микрогетерогенную эмульсию, приготовленную на опытной установке, в сравнении с безводным дизельным топливом, концентрация оксидов азота уменьшилась в 1,4 раза,

а удельный эффективный расход топлива увеличился всего на 4-5 г/(кВт·ч). Максимальное давление сгорания увеличилось на 0,7 МПа.

Таблица 1

Параметры рабочего процесса опытного дизеля при работе на дизельном топливе и водотопливных эмульсий различной дисперсности на номинальном режиме.

Вид топлива	Начало процесса сгорания, °ПКВ	Окончание процесса сгорания, °ПКВ	Максимальное давление сгорания, P _z , МПа	Длительность периода горения, °ПКВ
Дизельное безводное	-5	25	7,3	30
Грубая эмульсия C _w =15%	-4	27	7,9	31
Микрогетерогенная ВТЭ C _w =15%	-4,5	35	8,0	39,5

Заключение

Проведённые нами экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования микрогетерогенной эмульсии, для снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами в судовых дизельных энергетических установках при незначительном (4–5) г/(кВт·ч) повышении удельного расхода топлива.

Литература

- 1 Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78) / книга III. – СПб.: ЗАО ЦИИМФ, 2000. – 282 с.
- 2 Pounders. Marine Diesel Engines and Gas Turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth–Heinemann. Linacre House. Jordan Hill. Oxford OX2 8DP. – 2004. – 884 p.
- 3 Лебедев, О.Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях/О.Н. Лебедев, В.А. Сомов, В.Д. Сисин // – Л.: Судостроение, 1988. –328 с.
- 4 Zhang, T, Okada, H, Tsukamoto, T, Ohe, K. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels. Paper № 193, CIMAC 2007, Vienna.
- 5 Андриященко, С.П. Экспериментальная установка для получения микрогетерогенной водотопливной эмульсии / В. Е. Антонов, С. П. Андриященко, В.В. Попков, Г.С. Юр // Обновление флота – актуальная проблема водного транспорта на современном этапе. Ч.1: Материалы Международной юбилейной научно-технической конференции/ Новосибирская государственная академия водного транспорта. – Новосибирск, 2011. – Ч.1. – С. 158—159.

References

- 1 Mezhdunarodnaya Konventsiya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov 1973, (MARPOL 73/78) [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973]. kniga III. SPb.: ZAO TsIIMF, 2000. 282 s.
- 2 Pounders. Marine Diesel Engines and Gas Turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth–Heinemann. Linacre House. Jordan Hill. Oxford OX2 8DP. 2004. 884 p.
- 3 Lebedev, O.N. Vodotoplivnye emul'sii v sudovykh dizelyakh [Water-fuel emulsions in marine diesel engines]. O.N. Lebedev, V.A. Somov, V.D. Sisin. L.: Sudostroenie, 1988. 328 s.
- 4 Zhang, T, Okada, H, Tsukamoto, T, Ohe, K. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels. Paper № 193, CIMAC 2007, Vienna.
- 5 Andryushchenko, S.P. Eksperimental'naya ustanovka dlya polucheniya mikrogeterogennoi vodotoplivnoi emul'sii [Experimental setup for obtaining microheterogeneous water-fuel emulsion]. V.E. Antonov, S.P. Andryushchenko, V.V. Popkov, G.S. Yur. Obnovlenie flota – aktual'naya problema vodnogo transporta na sovremennom etape. Ch. 1:

Materialy Mezhdunarodnoi yubileinoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii/ Novosibirskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta. Novosibirsk, 2011. Ch.1. S. 158-159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Петрович Андリュщенко, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Сибирский государственный университет водного транспорта. 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Andryushchenko S. Petrovich, Ph.D (Eng) Siberian State University of Water Transport 630099, Shchetinkin Str. 33, Novosibirsk, Russian Federation e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Сергей Владиленович Титов, кандидат технических наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Сибирский государственный университет водного транспорта. 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Sergei V. Titov, Ph.D (Eng) Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Геннадий Сергеевич Юр, доктор технических наук, профессор кафедры судовых энергетических установок, Сибирский государственный университет водного транспорта. 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: ksdvs@nsawt.ru

Gennadii S. Yur, Dr. Sci. (Eng) Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: ksdvs@nsawt.ru

УДК 621.515.001.5

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016

Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса

А.А. Крюков¹, С.В. Чехранов¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В данной работе рассматриваются особенности течения потока в проточной части центростремительной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Такие турбины относятся к конструктивному классу турбин так называемого безвентиляционного типа. В связи с тем, что рабочие лопатки содержатся не на всей окружности рабочего колеса, а при этом сопла в сопловом аппарате размещены по всей окружности, то это обстоятельство оказывает очень большое влияние на характер течения потока в сопловом аппарате. Прежде всего, особенности работы соплового аппарата заключаются в том, что при вращении рабочего колеса сопла работают в режиме периодического открытия и закрытия, чего не наблюдается у турбин традиционного типа. А такие режимы работы сопел неизбежно отражаются на характере течения потока в них и на величине потерь кинетической энергии. В связи с этим, возникает задача по проведению численного эксперимента на базе программного комплекса вычислительной гидродинамики с необходимостью определения поля скоростей в проточной части турбины в условиях периодического открытия и закрытия крайних сопел. В работе используется метод численного моделирования трехмерного течения потока в среде программного комплекса вычислительной гидродинамики. В качестве основной наиболее подходящей модели используется – нестационарная модель URANS. В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты работы: поле числа Маха в проточной части турбины на различных режимах открытия и закрытия сопла, значения коэффициента скорости соплового аппарата, и коэффициента полезного действия турбинной ступени.

Ключевые слова: малорасходные турбины, сопловой аппарат, численный эксперимент, расчетная сетка, нестационарная модель URANS

Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel

Aleksey A. Krykov¹, Sergei V. Chekhranov¹¹Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. This paper discusses the flow features in the flow channel of an inflow low-consumption turbine with fractional blading of the rotor wheel. Such turbines belong to the design class of turbines of the so-called non-ventilation type. Due to the fact that the rotor blades are not contained on the entire pitch circle, while the nozzles in the nozzle diaphragm are placed around the entire circuit, this circumstance has a great influence on the flow regime in the nozzle diaphragm. First of all, the features of the nozzle diaphragm are that during the rotor wheel rotation the nozzles operate in the repetitive opening and closing mode, which is not observed in traditional type turbines. And such nozzles operating modes inevitably affect the regime of its flow and the kinetic energy loss. Thereby, a numerical experiment was conducted on the basis of the computational fluid dynamics software package with the need to determine the velocity field in the flow channel of the turbine in the conditions of periodic opening and closing of the extreme nozzles. This paper discusses uses the method of numerical simulation of three-dimensional flow using the of the computational fluid dynamics software package. The most suitable model is the non – stationary URANS model. In the course of the experiment, the following results were obtained: the Mach number in the flow channel of turbine on different modes of opening and closing the nozzle, the value of the speed coefficient of the nozzle diaphragm, and efficiency of turbine stages.

Keywords: low-consumption turbines, nozzle diaphragm, numerical experiment, computational mesh, non – stationary URANS model

Введение

Малорасходные турбины (МРТ) широко используются в самых различных областях человеческой деятельности. Причем, области их применения неизменно расширяются. Это связано не только с тем, что МРТ являются компактными и в то же время мощными приводами различных механизмов, но и с тем, что они постоянно совершенствуются на базе новых научных достижений.

Дело в том, что у МРТ достаточно большой резерв для повышения к.п.д., поскольку одним из основных признаков МРТ является их малоразмерность, которая приводит к повышенным внутренним и лопаточным потерям энергии. По этой причине значительная часть МРТ выполняется парциальными.

Борьба с потерями от парциальности уже привела к созданию большого числа конструкций МРТ, каждая из которых имеет свои особенности проектирования и расчета. Одним из направлений совершенствования парциальных турбин является создание так называемых МРТ безвентиляционного типа, у которых существенная часть потерь от парциальности снижается за счет воздействия на них конструктивных параметров. Это турбины конструкции ЛПИ [1] и турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса (ПК) [2].

Одной из таких МРТ безвентиляционного типа является центростремительная турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса. Эта турбина обладает целым рядом свойств ранее не встречавшихся в других конструкциях МРТ.

В связи с этим возникает необходимость исследования особенностей протекания газодинамических процессов с целью выработки рекомендаций для расчета и проектирования центростремительных МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Объект исследования – малорасходная центростремительная турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Предмет исследования – газодинамические характеристики соплового аппарата и рабочего колеса малорасходной центростремительной турбины.

Метод исследования – численное моделирование течения газа в среде программного комплекса ANSYS CFX.

Анализ влияния конструктивных факторов на работу ступени

Как видно из рисунка 1, особенностью МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса является конструкция РК. Рабочие лопатки расположены только на части окружности РК, образующей активную дугу впуска, а на неактивной дуге место лопаток занято сплошным телом диска. Отсутствие лопаток на неактивной дуге и позволяет отнести эти турбины к МРТ безвентиляционного типа.

В такой турбине рабочее тело подводится к соплам по всей окружности соплового аппарата (СА) как в традиционных турбинах с полным впуском. В соплах, которые в текущий момент времени располагаются против активной дуги РК течение потока происходит аналогично течению в соплах традиционных турбин. А в соплах, которые расположены против сплошного диска РК, течение потока резко ограничено. Причем, эти сопла не могут быть заперты полностью, поскольку между СА и РК существует межвенцевой зазор. Поэтому какое-то движение рабочего тела в этих соплах все равно будет из-за вытекания этого тела в зазор. И чем более будут сопоставимы площади выходного сечения сопла и поперечного кольцевого зазора между венцами, тем более интенсивно будет вытекать поток из сопел в зазор даже на неактивной дуге РК. Это обстоятельство следует учитывать при оценке величины подсоса рабочей среды из межвенцевого зазора в область активной дуги.

Главной особенностью описываемой турбины является работа сопел в процессе вращения рабочего колеса. На рис. 1 РК вращается против часовой стрелки, поэтому сопла слева от облопаченной части РК открываются, попадая в активную зону, а сопла, расположенные справа от активной дуги, закрываются по мере углового перемещения этой дуги.

Таблица 1

Геометрические характеристики центростремительной турбины

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Угол наклона сопел, α_1	16,31 °	Высота лопатки РК вход, l_1	3,29 мм
Высота сопла, l_1	2,53 мм	Высота лопатки РК выход, l_1	4,3 мм
Шаг сопел, t_{CA}	5,88 мм	Ширина горла, a_2	1,5 мм
Ширина горла, a_1	1,45 мм	Шаг лопаток РК, t_{RK}	2,54 мм
Количество сопловых лопаток, Z_1	27	Наружный диаметр РК, D_H	50 мм
Угол входа потока в РК	90°	Угол выхода потока в РК	42°

Отсюда следует, что каждое сопло при вращении РК постепенно открывается и постепенно закрывается. И только определенную часть времени сопла полностью открыты и работают в обычном режиме как у турбин традиционного типа. Очевидно также и то, что чем больше длина активной дуги, тем большую долю времени сопла работают в свободном режиме. И соответственно, при малой длине активной дуги значительная часть времени работы сопел будет происходить в режиме открывания и запираания. Ни у одного типа известных турбин сопла не работают в подобном режиме. Именно это обстоятельство и заставляет проводить отдельные исследования для определения коэффициента скорости соплового аппарата и структуры потока в центростремительных МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса.

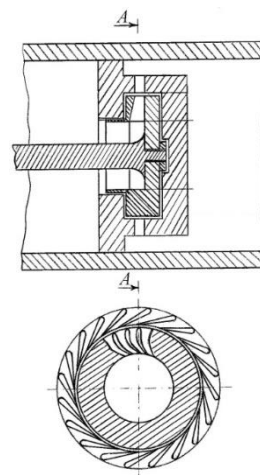


Рис. 1. Центростремительная турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Проведение численного эксперимента в среде ANSYS CFX

Одним из современных способов исследования подобных ступеней является частичная замена физического эксперимента численным. Использование программного комплекса ANSYS CFX позволяет создавать расчетную модель турбины, определять выходные параметры ступени и визуализировать структуру потока, которая позволяет дать оценку процессам, протекающим в парциальной турбине.

Геометрическая модель проточной части создавалась средствами приложения AutoCAD. В силу не осесимметричной конструкции ротора моделировалась вся ступень целиком, а не только один сектор. Геометрические характеристики приведены в таблице 1.

В качестве граничных условий применяются стандартные граничные условия для задач турбомашин без моделирования теплообмена:

- давление воздуха на входе в сопло $P_0^* = 0,2$ МПа, температура на входе в сопло $T_0^* = 293$ К;
- давление на выходе из колеса $P_2 = 0,1$ МПа;
- степень турбулентности на входе в расчетную область принимается равной 5%;
- частота вращения рабочего колеса 30 000 мин⁻¹.
- газовая постоянная $R = 287$ Дж/кг·К,
- показатель адиабаты $k = 1,4$.

Создание расчетной сетки является важной частью численного моделирования газодинамического поля потока. В данной работе сетка выполнена в ANSYS Mesh. Она содержит для соплового аппарата 2,1 млн узлов и 1,39 млн элементов, рабочее колесо 1,36 млн узлов и 730,8 тыс. элементов. Сетка неструктурированная. Результаты расчета показали, что параметр y^+ лежит в пределах $1 < y^+ \leq 5$, что свидетельствует о достаточной точности расчета поля потока в переходной области в пограничном слое.

Расчетная модель состоит из: соплового аппарата, рабочего колеса и радиального зазора с уплотнением. Созданная расчетная сетка, для исследуемой ступени, соответствует основным требованиям, по обеспечению достоверности результатов. Наиболее подходящей моделью турбулентности для выбранной модели является SST (Shear Stress Transport) [3]. С целью определения степени достоверности результатов моделирования, используется стационарная RANS модель с интерфейсом между статором и ротором типа Frozen rotor [4] и нестационарная модель URANS с интерфейсом Transient Rotor Stator.

Одним из главных вопросов при постановке нестационарного расчета является выбор временной дискретизации. Для разрешения процесса нестационарного взаимодействия соплового аппарата и рабочего колеса шаг по времени согласован с шагом по пространству с помощью числа Куранта (CFL – критерий Куранта-Фридрихса-Леви). Критерий CFL позволяет произвести расчет по десяти характерным положениям рабочего колеса, относительно соплового аппарата.

В рамках стационарного подхода для скорости и величин торможения производится осреднение квадратов этих величин по расходу в

соответствующем сечении, статические величины осредняются по площади. В рамках нестационарного подхода подлежат двойному осреднению – по поверхности и по времени. Осреднение по поверхности осуществляется в рамках каждого временного шага. [5, с.57-58]

Результаты проведения численного эксперимента турбинной ступени с применением стационарного и нестационарного подходов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение результатов стационарного и нестационарного расчетов

Параметр	Frozen rotor	Transient Rotor Stator
G_1 , кг/с	0,0033	0,0032
P_1 , МПа	0,1461	0,147
c_1 , м/с	192,837	182,793
ρ_t	0,5246	0,5319
w_1 , м/с	157,79	143,44
w_2 , м/с	182,85	169,94
c_2	147,238	141,93
φ	0,858	0,821
ψ	0,674	0,647
η_u	0,227	0,20
η_i	0,041	0,026
η_i^*	0,052	0,042

Уровень эффективности ступени по результатам нестационарного расчета существенно ниже по сравнению со стационарным расчетом. Это связано с тем, что при сопряжении течения способом Frozen Rotor неоднородный поток без окружного осреднения попадает на рабочую решетку, а в Transient Rotor Stator учитывается нестационарное взаимодействие соплового и рабочего венцов.

Так же стоит отметить и величину разницы между внутренним коэффициентом полезного действия по результатам стационарного и нестационарного расчетов, которая составляет порядка 2%, что схожа с результатом других работ [6].

Объективную оценку степени достоверности результатов, позволит дать сравнение расчетных и экспериментально определенных внешних характеристик ступени (например коэффициент полезного действия ступени). Сравнение коэффициента полезного действия ступени, полученного на основе численного и физического экспериментов, это наиболее простой способ оценки достоверности результатов численного моделирования. Сравняя значения коэффициента полезного действия ступени в численном эксперименте с ранее проведенным физическим [7, с.195], можно сделать вывод, что разница лежит в пределах погрешности эксперимента, не превышает его значения не более чем на 2,5%. Такой результат можно считать достоверным.

Принимая во внимание все вышеизложенное, для дальнейшего расчета принимается нестационарный подход Transient Rotor Stator, а так же для моделирования процессов в проточной части МРТ подход URANS. Расчет задачи производится по двум этапам. На первом этапе задача решается в квазистационарной постановке, на втором этапе - в нестационарной. Решение задачи в квазистационарной постановке дает первое приближение, которое уточняется в нестационарной.

На рисунке 2 виден момент открывания сопла А. На кромке сопловой лопатки наблюдается значительный скачок скорости, который распространяется на все горло соплового канала. Процесс перетекания газа через зазор сопровождается дросселированием рабочего тела и постепенным увеличением скорости потока. При смешении дросселированного газа с рабочим телом из соплового канала В происходит торможение потока, что приводит к вихреобразованию в ядре потока рабочего канала А. Вихрь разрушается, когда поток достигает определенного радиуса выравнивания.

В рабочем канале В наблюдается схожая картина течения газа с образованием вихря, но он значительно слабее. Причина этому является открытость сопловых каналов В и С. Смешение двух потоков приводит к вихрю, который быстро разрушается с дальнейшим выравниванием потока.

На рисунке 3 представлено поле числа Маха при открытии крайнего левого сопла А на 50%. В сопловом канале А наблюдаются застойные зоны (зоны рециркуляции) сопровождающие местным повышением давления. Смешение потоков из застойной зоны и ускоренного потока со стороны горла соплового канала А. Также наблюдается подсос рабочего тела соплового канала В в рабочий канал А, все эти факторы порождают образование вихря в этом канале. В рабочем канале В течение более равномерное, подсос в рабочий канал со стороны сопла В приводит к отрыву потока от крайней правой стенки и образованию вихря.

При практически полном открытии соплового канала А остаются незначительные зоны рециркуляции, а так же осуществляется подсос рабочего тела из закрытого соплового канала О и канала В. Отрыв пограничного слоя на спинке лопатки усиливает процесс вихреобразования в ядре потока рабочего канала А. В рабочем канале В так же присутствует вихрь, его природа схожа с предыдущими.

Во всех рассмотренных случаях, через неактивные сопловые каналы имеется установившийся подсос газа в межлопаточный зазор. Через этот зазор происходит утечка газа, величина которой определяется лабиринтным уплотнением в периферийной части рабочего колеса, размером зазора, степени впуска и отношения давлений газа в канале активной к неактивной зоне. Так же наблюдается торможение потока у входной кромки рабочей лопатки, что свидетельствует о наличии углов атаки, что вызвано взаимодействием с протечками через зазор. Картина течения газа через зазор между сопловыми и рабочими лопатками существенно отличается и подтверждается работой [8].

Составление энергетического баланса ступени позволяет обнаружить заметное снижение эффективности элементов конструкции и дать рекомендации по ее совершенствованию:

$$\Delta h_T = \Delta h_i + (\Delta h_c + \Delta h_l + \Delta h_{\text{вых}} + \zeta_{\text{пар}} + \zeta_d + \zeta_{\text{ут}}) \quad (1)$$

Разделить потери, относящиеся только к сопловому аппарату и потери от смешения в

межвенцевом зазоре на представленных полях скоростей крайне затруднительно. Когда один сопловой канал постепенно закрывается, а другой постепенно открывается, сложно разделить поток на возмущенный и невозмущенный. При минимальном значении степени парциальности доля подсоса в активную зону возрастает, а это приводит к повышению потери от смешения в зазоре. Использование программного комплекса ANSYS CFX позволяет определить значения коэффициента потерь сопла ζ , при различной степени перекрытия соплового канала.

Расчет основных параметров производится в следующей последовательности:

Располагаемый перепад энтальпий на ступень:

$$H_0 = R \times \frac{k}{k-1} \times T_0^* \times \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_t} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (2)$$

где T_0^* - температура газа на входе в сопловый аппарат;

R - газовая постоянная рабочего тела;

k - изэнтропический показатель рабочего тела;

π_t - перепад давлений входа и выхода в ступень;

Перепад энтальпий на сопло:

$$H_{SA} = R \times \frac{k}{k-1} \times T_0^* \times \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \quad (3)$$

где T_0^* - температура рабочего тела на входе в сопловый аппарат;

R - газовая постоянная рабочего тела;

k - изэнтропический показатель рабочего тела;

P_1 - давление рабочего тела на выходе из соплового аппарата;

P_0^* - давление рабочего тела на входе в сопло.

Коэффициент скорости сопла:

$$\varphi = \frac{c_1}{\sqrt{2 \times H_{SA}}} \quad (4)$$

где c_1 - скорость на выходе из соплового аппарата.

H_{SA} - перепад энтальпий на сопло;

Коэффициент потерь в сопле:

$$\zeta = 1 - \varphi^2$$

В таблицах 3 и 4 показаны выходные данные сопловых каналов в зависимости от степени открытости F. Коэффициент потерь ζ крайнего открывающегося сопла по мере открытия падает и достигает своего минимума у при полном открытии.

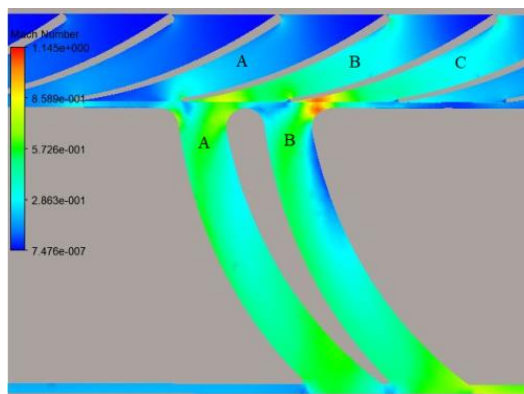


Рис. 2. Поле числа Маха с приоткрывающим сопловым каналом А

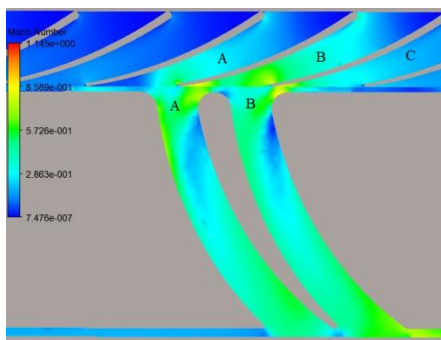


Рис. 3. Поле числа Маха с открытым сопловым каналом А на 50%

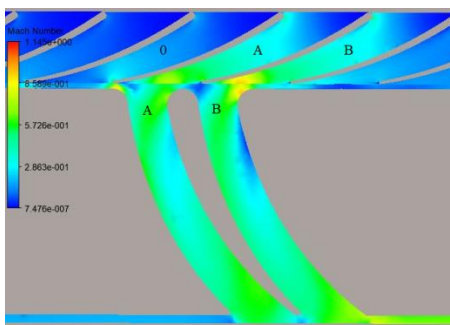


Рис. 4. Поле числа Маха с открытым сопловым каналом А на 100%

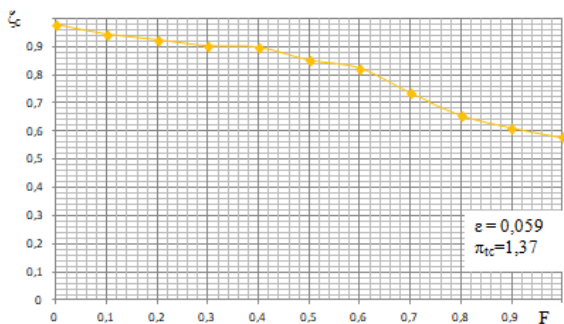


Рис. 5. Зависимость изменения коэффициента потерь открывающегося сопла от степени открытия

В крайнем закрывающемся канале при его закрытии (сужение проходного сечения канала) до размеров горла соплового канала a_2 коэффициент ζ падает. При дальнейшем закрытии крайнего канала, значение коэффициента потерь начинает увеличиваться, так как расширившийся газ в косом срезе, проходить через более узкое сечение, чем горло соплового канала a_2 .

Суммарный коэффициент потерь в сопловом аппарате зависит от потерь в крайних сопловых каналах и в канале, находящийся в самой активной дуге. Графики изменения коэффициента потерь открывающегося и закрывающегося сопла показаны на рис. 5 и рис. 6. Для определения суммарного коэффициента скорости ϕ активной дуги соплового аппарата было необходимо задать поверхность на выходе из активных сопел. Поверхность синхронно перемещается вместе с рабочим колесом, тем самым позволяет снимать осредненные параметры с частично задействованными соплами. Протяженность поверхности определяется длиной

активной дуги, и может быть определена по формуле:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{n} \theta, \quad (4)$$

где $n=34$ – максимальное количество лопаток на рабочем колесе;

$\theta=2$ – количество рабочих каналов РК.

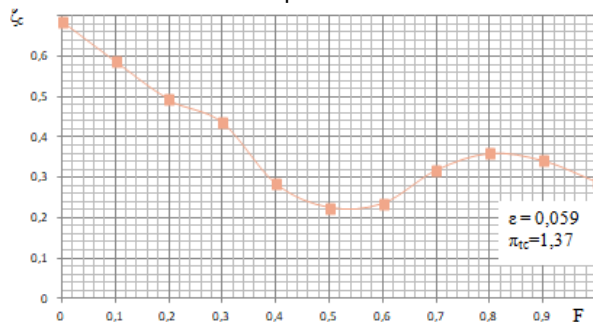


Рис. 6. Зависимость изменения коэффициента потерь закрывающегося сопла от степени открытия

Таблица 3
Сводная таблица выходных данных крайнего открывающегося соплового канала

Параметр	Степень открытия соплового канала F				
	10%	30%	50%	70 %	100%
P_1 , МПа	0,146	0,146	0,144	0,148	0,144
c_1 , м/с	55,38	72,42	89,18	114,7	148,7
H_0 , МДж/кг	52,88	52,88	52,88	52,88	52,88
H_{CA} , МДж/кг	25,30	25,30	26,36	24,26	26,36
ϕ	0,246	0,322	0,388	0,521	0,648
ζ	0,939	0,896	0,849	0,728	0,581

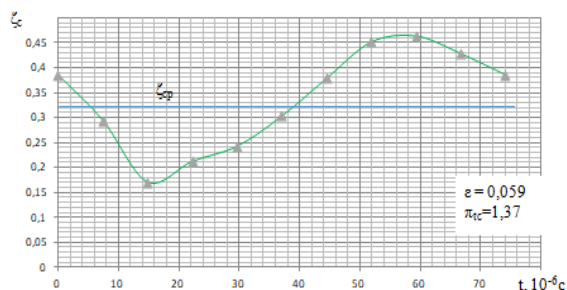


Рис. 7. Зависимость изменения коэффициента потерь в сопловом аппарате от времени перемещения РК на длину шага сопловой решетки

Таблица 4
Сводная таблица выходных данных крайнего закрывающегося соплового канала

Параметр	Степень открытия соплового канала F				
	10%	30%	50%	70 %	100%
P_1 , МПа	0,141	0,145	0,146	0,145	0,149
c_1 , м/с	148,3	171,8	198,1	188,4	180,9
H_0 , МДж/кг	52,88	52,88	52,88	52,88	52,88
H_{CA} , МДж/кг	27,97	25,83	25,30	25,83	23,74
ϕ	0,627	0,756	0,880	0,829	0,830
ζ	0,607	0,428	0,225	0,313	0,311

На рис. 7 представлен график изменения коэффициента потерь в сопловом аппарате от времени перемещения РК на длину шага сопловой решетки. Время определено нестационарным подходом Transient Rotor Stator проводимым с шагом по

времени около $7,4 \times 10^{-6}$ с, что соответствует 10-и взаимным положениям сопловой и рабочей решеток за цикл смещения рабочей лопатки на величину шага сопловой решетки. Изменение значения ζ объясняется нестационарным взаимодействием соплового и рабочего венцов. Относительно низкие значения коэффициента потерь на промежутке открытия до 50%, объясняется наличием между крайними сопловыми каналами, активного канала открытого на 100%, рис.2 и рис. 3.

Заключение

По результатам исследования можно прийти к следующим выводам:

- влияние парциальности на потери носит сложный, смешанный, нестационарный характер;
- значения коэффициента потерь открывающегося сопла падает по мере открытия и варьирует в диапазоне $0,598 \div 0,965$;
- значения коэффициента потерь закрывающегося сопла ниже значения коэффициента потерь открывающегося сопла варьирует в диапазоне $0,294 \div 0,598$;

– значения коэффициентов потерь сопел влияют на суммарный коэффициент скорости φ , который при $\varepsilon=0,059$ и $\pi_{tc}=1,37$ составляет 0,821;

– в рабочих каналах течение более равномерное, так как в отличие от сопловых каналов не работают в режиме открытия-закрытия;

– подсосы в рабочие каналы со стороны крайних сопел приводит к отрыву потока и образованию вихря, значения коэффициент скорости φ составляет 0,6468;

– сравнение значений коэффициента полезного действия ступени в численном эксперименте с ранее проведенным физическим позволяет сделать вывод, что разница лежит в пределах погрешности эксперимента, не превышает его значения более чем на 2,5% и такой результат можно считать достоверным;

– полученный уровень внутренний КПД по статическим параметрам в 2,6 % и внутренний КПД по полным параметрам 4,3 % показывает, что конструкция малорасходной турбины требует совершенствования.

Литература

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161;
2. Чехранов С.В. Экспериментальное исследование радиальных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса *Transport business in Russia*, № 6, 2015, с. 280-284;
3. Раков Г.Л. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н.А. Забелин, Г.Л. Раков, В.А. Рассохин, А.А. Себелев, М.В. Смирнов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №1 (166). С. 45 – 53;
4. Крюков А.А. Трехмерный газодинамический расчет соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 89-95;
5. Себелев А.А. Совершенствование малоразмерных турбин с осесимметричными соплами: диссертация канд. техн. наук: 05.04.12. - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 2017 – 137 с;
6. Епифанов А.А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / Епифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 1–2012, с. 65–70;
7. Чехранов С.В. Малорасходные турбины безвентиляционного типа: Основы построения, математические модели, характеристики и обобщения: диссертация докт. техн. наук: 05.04.12. - Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, 1999 – 363 с;
8. Крюков А.А., Чехранов С.В. Сравнение течения потока в ступенях малорасходных центростремительных парциальных турбин *Материалы VI Международной научно-технической конференции: Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана, Владивосток : Дальрыбвтуз, 2020. – Ч. I. – с. 217-221 с*

References

1. Rassohin, V.A. Turbiny konstrukcii LPI: Preimushhestva, harakteristiki, opyt razrabotki i primenenie. [Design turbines of LPI: Advantages, characteristics, development experience and application] Trudy SP6GPU. 2004. № 491. С. 152-161;
2. Chehranov S.V. Jeksperimental'noe issledovanie radial'nyh turbin s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola [Field research of radial flow turbines having partially bladed wheel rotor] *Transport business in Russia*, № 6, 2015, s. 280-284;
3. Rakov G.L. Issledovanie osobennostej techenija v malorashodnyh turbinnyh stupenjakh konstrukcii LPI. N.A. Zabelin, G.L. Rakov, V.A. Rassohin, A.A. Sebelev, M.V. Smirnov // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2013. №1 (166). С. 45 – 53;
4. Krjukov A.A. Trehmernyj gazodinamicheskij raschet soploвого apparata malorashodnoj centrostremitel'noj turbiny. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. 2019. № 4. S. 89-95;
5. Sebelev A.A. Sovershenstvovanie malorazmernih turbin s osesimmetrichnymi soplami: dissertacija kand. tehn. nauk: 05.04.12. - Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo, Sankt-Peterburg, 2017 – 137 s;

6. Epifanov A.A. Raschet trehmernogo techenija v stupenjah malorashodnyh turbin. Epifanov A.A., Kirillov A.I., Rassohin V.A. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 1–2012, s. 65–705;
7. Chehranov S.V. Malorashodnye turbiny bezventiljacionnogo tipa: Osnovy postroenija, matematicheskie modeli, harakteristiki i obobshhenija: dissertacija dokt. tehn. nauk: 05.04.12. - Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tehničeskij rybohozajstvennyj universitet, Vladivostok, 1999 – 363 s;
8. Krjukov A.A., Chehranov S.V. Sravnenie techenija potoka v stupenjah malorashodnyh centrostremitel'nyh parcial'nyh turbin Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii: Aktual'nye problemy osvoenija biologičeskikh resursov Mirovogo okeana, Vladivostok : Dal'rybvtuz, 2020. – Ch. I. – s. 217-221 s

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Алексеевич Крюков, аспирант кафедры Судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: aleksey902@mail.ru

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

Aleksey A. Krykov, postgraduate of Department of Marine Power Systems Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok 690087, Russian Federation e-mail: aleksey902@mail.ru

Sergei V. Chekhranov, doctor of technical Sciences, 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

Метод расчета расхода топлива судового дизеля при эксплуатационно-техническом обосновании судов внутреннего плавания

А.Ю. Платов¹, Ю.И.Платов², О.Ю.Васильева²

¹Нижегородский архитектурно-строительный университет, ²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Предложен метод расчёта расхода топлива судового дизеля на разных режимах, для которого достаточно знания всего одного параметра – эффективной мощности двигателя. Потребность в таком методе обусловлена необходимостью оценки эксплуатационных расходов на ранних стадиях проектирования, когда эксплуатационные параметры судна неизвестны. Существующие методы оценки расхода топлива, требующие минимального набора параметров, не позволяют адекватно учитывать изменяющиеся условия плавания, что характерно для работы речных судов. Приведён анализ некоторых таких методов. На основе аппроксимации индикаторного к.п.д. построен аналитический метод, вычисляющий расход топлива судового дизеля при заданной мощности и относительной частоте вращения. Приводятся примеры расчёта расхода топлива для реального судна и стендовой характеристики судового дизеля. Построенный метод позволяет дополнить существующие методы расчёта ходкости новых судов и адекватно прогнозировать расход топлива в условиях эксплуатации судов на внутренних водных путях.

Ключевые слова: суда внутреннего плавания, судовые дизели, расход топлива, аппроксимации универсальных характеристик, кубическая аппроксимация удельного расхода топлива, эксплуатационно-экономическое обоснование судов, прогнозирование расхода топлива.

Prediction of fuel consumption for marine diesel in feasibility study of inland ship design

Alexander J. Platov¹, Juri I. Platov², Oksana J. Vasileva²

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, ²Volga State University of Water Transport

Abstract. A method for calculating the fuel consumption of marine diesel engines is proposed. It is enough for this to have only one parameter - the brake power. This method is necessary as there is the need to estimate operating costs in the early stages of ships design, when the ships parameters are unknown. Existing methods for estimating fuel consumption, requiring a minimum set of parameters, are not adequate for inland waterway conditions. An analysis of some of these methods is given. Based on approximation of indicator efficiency proposed analytical method for prediction of the fuel consumption of a marine diesel engine at a given power and relative speed is based on the analytical approximation of indicated thermal efficiency. Examples of predicting fuel consumption for the real ship and the marine diesel engines are given. The proposed method complements the existing methods for propulsion of new ships and to adequately predict of fuel consumption on inland waterways.

Keywords: inland ships, marine diesels, fuel consumption, mapping BSFC contour, cubic approximation of specific fuel consumption, feasibility study of ship design, fuel consumption prediction.

Введение

Задача эксплуатационно-технического обоснования судов решается для определения экономически обусловленных ключевых параметров (грузоподъёмности, скорости, мощности) судна и условий его эксплуатации, а также предваряет этапы (эскизное, техническое и рабочее) проектирования судов [1].

В состав параметров нового судна входят помимо всего прочего характеристики, связанные с расходом топлива главными двигателями (ГД). Важность этой составляющей не вызывает сомнения, однако имеющиеся в литературе способы прогнозирования расходов топлива, основанные на регрессиях, чрезвычайно упрощены и отличаются большими погрешностями.

Поскольку при эксплуатационно-техническом обосновании судов в центре внимания находятся такие параметры судна как скорость, мощность, размерения, грузоподъёмность и т. д., то использование моделей судовых дизелей, разработанных для задач нормирования расхода топлива [2], представляется нецелесообразным из-за несоответствия уровней абстракции моделей.

Таким образом, имеется необходимость в разработке методов расчёта расхода топлива судовыми двигателями для использования в задачах обоснования судов. Ниже описывается метод, основанный на аппроксимации индикаторного к.п.д. (МАИК), предназначенный специально для решения таких задач.

Методы аппроксимации винтовой характеристики

Существующие методы расчёта расхода топлива ГД судов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, основанные на непосредственном моделировании винтовой характеристики комплекса корпус-двигатели-двигатели (КДД), что сводится к построению регрессионной зависимости часового расхода топлива G как функции скорости v : $G = f(v)$.

Для методов второй группы характерно построение отдельных моделей скоростных характеристик пропульсивного комплекса и универсальных характеристик дизеля в форме

$$G = f(n, N_e),$$

где n , N_e - частота вращения вала и эффективная мощность соответственно, и последующее

объединение этих моделей в систему уравнений комплекса КДД.

В ранних отечественных работах для моделей первого типа [3] и второго типа [4] предлагались степенные зависимости с разными показателями степени. В работе [5] использовалась кубическая зависимость, в которой часовой расход топлива G вычислялся по значению скорости судна v следующим образом:

$$G = cv^3, \quad (1)$$

где c - некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от типа судна.

Эта зависимость использовалась в 1972 г. для расчёта норм расхода топлива для составов с толкачом типа «Дунайский».

В зарубежной литературе кубическая зависимость введена впервые в статье [6] в качестве метода расчёта суточного расхода топлива морского судна, но широкую известность кубическая формула получила после публикации [7].

Во многих источниках, например [8, 9, 10], кубическая зависимость часового расхода топлива выводится через адмиралтейский коэффициент и получается зависимость вида:

$$G = c' D^{\frac{2}{3}} v^3,$$

где D - водоизмещение судна, а c' - некоторый коэффициент пропорциональности, устанавливаемый статистическим путём.

Несмотря на такую популярность и простоту, кубическая формула может иметь значительную погрешность. Причина заключается в том, что в формуле типа (1) эффективный к.п.д. дизеля косвенно принимается за постоянную величину.

Действительно, часовой расход топлива связан с эффективной мощностью физической зависимостью:

$$G = 3600 \frac{N_e}{\eta_e H_u},$$

где N_e - эффективная мощность ГД, кВт; η_e - эффективный к.п.д.; H_u - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Если принять, что сопротивление судна примерно пропорционально квадрату скорости, а коэффициенты засасывания и попутного потока мало изменяются со скоростью судна, то эффективная мощность при работе ГД на винтовой характеристике будет изменяться по кубическому закону:

$$N_e \sim v^3. \quad (2)$$

Принимая $\eta_e = const$, получим кубическую зависимость G от скорости.

Если предполагать, что скорость судна не меняется значительно, то кубическая кривая будет иметь небольшую погрешность. Такое допущение приемлемо в случае движения на морских направлениях, но не годится на внутренних маршрутах из-за необходимости значительно (в 1,5-2 раза) снижать скорость в каналах, а также из-за мелководья.

Главная проблема использования любых, а не только кубических аппроксимаций винтовой характеристики состоит в затруднительности учёта условий плавания на реках. Поскольку гидродинамические параметры судна в простых

регрессиях не представлены, то пересчёт этих регрессий на мелководье может решаться только с помощью каких-то иных несложных регрессионных зависимостей.

Из литературы известно несколько способов такого пересчёта, которые так или иначе сводятся к перемножению часового расхода топлива на глубокой воде и некоторого коэффициента, зависящего от отношения глубины пути и осадки судна. Как показано в [11], эти способы дают качественно разные результаты (одни увеличивают G , другие уменьшают) и потому, в общем случае, неприменимы. Часовой расход топлива с уменьшением глубины пути увеличивается, но по достижении ограничительных характеристик уменьшается. Такая динамика не улавливается простыми регрессиями, которые ведут себя качественно одинаково при любых режимах движения.

Из (1) и (2) можно вывести, что при фиксированной частоте вращения

$$G \sim N_e. \quad (3)$$

Это соотношение позволяет «подключить» к кубическим регрессиям «гидродинамику» и корректировать часовой расход топлива, исходя из изменений эффективной мощности при утяжелении винтовой характеристики.

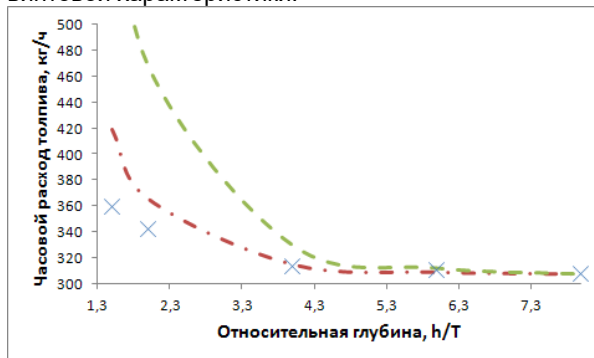


Рис. 1. Зависимость часового расхода топлива от глубины пути: штрих - пересчёт кубической параболы, штрих-пунктир - МАИК, x - данные испытаний

На рис. 1 приводится график данных испытаний из [12] для теплохода проекта №507Б «Волго-Дон», кубическая кривая вида (1), пересчитанная по изменению эффективной мощности, а также кривая, рассчитанная по МАИК, который описывается ниже. Нетрудно видеть, что при относительной глубине, равной 2, что соответствует 7 м – типичной глубине для внутренних магистральных путей, погрешность кубической кривой составляет почти 30%, а при меньшей глубине достигает 50%.

Регрессии другого типа – степенные и показательные, предлагаемые в литературе [13, 14, 15], в отличие от кубической сугубо формальны, и не могут быть связаны с «гидродинамикой» по типу (3). Поэтому для таких регрессий проблема учёта мелководья не решается физически корректным способом.

Таким образом, использование аппроксимаций первого типа для расчётов движения судов смешанного и внутреннего плавания может приводить к неверным результатам. Для подобных

расчётов требуется раздельное моделирование характеристик пропульсивного комплекса в составе корпус судна-двигателя, и универсальных характеристик главных двигателей, то есть отделение «гидродинамики» от «термодинамики».

Методы аппроксимации универсальных характеристик

Согласно классификации моделей ДВС, приведённой в статье [2], можно выделить аналитические модели 3-х разных типов, а также эмпирические модели, к которым относятся интерполяции номограмм дизелей, полиномиальные аппроксимации статистических данных и нейросетевые аппроксимации.

Применение аналитических моделей в задачах обоснования судов представляется нецелесообразным, так как использование подробных технических данных о двигателе имеет смысл на более поздних стадиях проектирования, когда проводится согласование двигателей с гребными винтами.

В соответствии с уровнем абстракции моделей, который необходим для задач обоснования судов, имеет смысл рассматривать упрощённые аппроксимации, основанные на некоторой эмпирике, но требующих минимум данных для своей калибровки.

Самая простая зависимость для определения часового расхода топлива на винтовой характеристике приводится в [16, 17]:

$$G = cn^3,$$

где c - постоянный коэффициент, n - частота вращения вала ГД, об/мин.

Поскольку частота вращения вала ГД и скорость судна при обычных скоростях движения речных судов связаны почти линейной зависимостью, то приведённая зависимость косвенно предполагает уже рассмотренное упрощение $\eta_e = const$. При этом возникает аналогичная проблема пересчёта постоянного коэффициента на более «тяжёлые» или «лёгкие» винтовые характеристики.

Другой подход – аппроксимация универсальных характеристик дизелей – рассматривается в нескольких работах.

Отечественные полиномиальные модели универсальных характеристик предлагались в [18, 19]. Число коэффициентов модели и, следовательно, степень полинома в этих моделях определялась требованиями точности аппроксимации.

В работе [20] строилась также полиномиальная аппроксимация, но она имела специальную форму – кубическую по частоте и квадратичную по моменту, что приводило к необходимости вычисления девяти коэффициентов по 100-250 точкам графика универсальных характеристик.

Для построения аппроксимации в [21] используются некоторые физически интерпретируемые зависимости элементов модели. Механический к.п.д. аппроксимируется квадратичной параболой, для аппроксимации индикаторного к.п.д. используется дробно-рациональное выражение и т.д. Всего в модели имеется 9 констант, которые определяются на основании от 40 до 50 точек с графика универсальных характеристик. В [22]

аппроксимируется эффективный к.п.д. с 8 константами.

Показательная аппроксимация с пятью или с семью коэффициентами предлагается в [23]. При аппроксимации универсальных характеристик по методу наименьших квадратов для этого метода требуется от 9 до 30 точек.

Как можно видеть, все вышеописанные методы нацелены в первую очередь на достижение высокой точности аппроксимации универсальных кривых, что достигается в том числе и ценой привлечения большого количества исходных данных – точек, снимаемых с графиков универсальных характеристик. Однако потребность в большом количестве таких точек в рамках задачи получения высокой точности самими авторами упомянутых методов рассматривается как недостаток.

Практическое применение таких аппроксимационных подходов затруднительно даже в задачах рейсового планирования. В реальной работе по внедрению систем планирования расхода топлива в крупных пароклотах затраты превысили бы разумные рамки, на которые готовы идти российские судовладельцы. А для задач эксплуатационно-технического обоснования новых судов ориентация на большой эмпирический материал становится не только затруднительной, но и просто бессмысленной в силу приближённости всех остальных расчётов, связанных с «гидродинамикой» и «экономикой» судна, на этом этапе проектирования.

На основе подобных соображений далее предлагается аппроксимационный метод, который может быть использован для прогнозирования затрат на топливо новыми судами при их эксплуатационно-техническом обосновании.

Методы аппроксимации индикаторного к.п.д.

Метод основан на аппроксимации индикаторного к.п.д. по способу Д.А. Портнова [24]:

$$\eta_i = \eta_{i0} \alpha^{1/\alpha},$$

где α – коэффициент избытка воздуха, η_{i0} – значение к.п.д. при $\alpha = 1$.

Для построения метода используем известные из теории ДВС зависимости:

$$N_e = N_i - N_m; N_i = \eta_i \frac{GH_u}{3600}; \alpha = \frac{G_L}{G_0 g_{ц}},$$

где N_i - индикаторная мощность ГД, кВт; N_m - мощность механических потерь, кВт; G_L - удельная масса воздуха в составе свежего заряда, кг/кг; G_0 - теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; $g_{ц}$ - цикловая подача топлива, кг.

Учитывая, что $g_{ц} \sim G/n$, можно составить следующее уравнение, которое образует основу метода:

$$N_e = A_1' \alpha^{1/\alpha} G - A_2', \quad (4)$$

где $\alpha = A_1' n / G$.

Как можно видеть, функция часового расхода топлива $G = f(n, N_e)$ получается из решения нелинейного уравнения (4).

Для модели требуются знать три величины A'_i , которые принимаются за константы на основе следующих дополнительных упрощений.

Во-первых, мощность механических потерь принимается постоянной, причём механический к.п.д. η_m задаётся равным 0,95. Поскольку величина A'_2 равна мощности механических потерь, то её можно вычислить по выражению:

$$A'_2 = N_{\text{еном}}(1 - \eta_m) / \eta_m,$$

где $N_{\text{еном}}$ - номинальная мощность ГД, кВт.

Во-вторых, принято, что коэффициент наполнения, определяющий G_L , также является постоянной величиной. Это позволяет считать A'_0 константой. В силу аппроксимации Д.А. Портнова A'_1 - также константа.

В первом варианте описываемого метода [25] для определения A'_0 предлагалось задавать универсальное для всех двигателей значение коэффициента избытка воздуха на номинальном режиме α_0 , из чего следовало:

$$A'_0 = \alpha_0 G_{\text{ном}} / n_{\text{ном}},$$

где $G_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ номинальные часовой расход топлива и частота вращения.

Однако поскольку значение коэффициента избытка воздуха на номинальном режиме отличается большой вариативностью, то такое предложение приводит часто к заметным погрешностям. Кроме того, в этом случае надо знать номинальную частоту вращения двигателя, чего для задач обоснования новых судов хотелось бы избежать.

Сформулируем описанные выше соотношения так, чтобы частота вращения и расход топлива были представлены в безразмерной форме. Для этого введём новые переменные:

$$\gamma = G / G_{\text{ном}}, \quad \theta = N_e / N_{\text{еном}}, \quad \omega = n / n_{\text{ном}}.$$

Тогда коэффициент избытка воздуха можно записать следующим образом:

$$\alpha = A_0 \omega / \gamma,$$

а эффективную мощность тогда можно представить как:

$$\theta = A_1 \alpha^{1/\alpha} \gamma - A_2. \quad (5)$$

Из уравнения (5) можно составить нелинейное уравнение относительно γ :

$$\gamma = f(\theta, \pi),$$

которое эффективно решается методом половинного деления.

При моделировании заданного двигателя коэффициенты модели A_i определяются на основании номинальных параметров ГД: $N_{\text{еном}}$, $G_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$. Для решения задач эксплуатационно-технического обоснования желательно исключить

два последних параметра. Для этого предлагается вместо $G_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном}}$ задавать положение точки минимума удельного расхода топлива $g_e = G / N_e$.

Так же введём ещё относительное среднее эффективное давление:

$$\pi = p_e / p_{\text{еном}},$$

где $p_{\text{еном}}$, p_e - среднее эффективное давление на номинальном и расчётном режиме соответственно, кПа. Относительная мощность в этом случае вычисляется как $\theta = \pi \omega$.

Положение точки минимума $\omega_{\text{мин}}$ и $\pi_{\text{мин}}$ на графиках универсальных характеристик переменное и может колебаться от 0,5 до 1,3. Но всё же это положение относительно устойчивое, и при обосновании новых судов его можно принять за постоянное.

Две константы $\omega_{\text{мин}}$ и $\pi_{\text{мин}}$ определяют первое уравнение для вычисления коэффициентов.

Второе уравнение следует из того, что при номинальных расходе топлива $\gamma = 1$ и частоте вращения $\omega = 1$ должна достигаться номинальная мощность $\theta = 1$. Третье уравнение определяет третий коэффициент:

$$A_2 = (1 - \eta_m) / \eta_m.$$

Прежде чем сформулировать два первых уравнения, заметим, что функция $\alpha^{1/\alpha}$ имеет минимум в точке $\alpha = e$. Очевидно, что это условие соответствует минимальному значению g_e . Отсюда получим, что минимальный относительный часовой расход будет выражаться как:

$$\gamma_{\text{мин}} = A_0 \omega_{\text{мин}} / e.$$

Также заметим, что при номинальном режиме очевидно, что $\alpha = A_0$, откуда ясен физический смысл этого коэффициента.

Прямого физического смысла коэффициент A_1 не имеет, но легко установить, что:

$$A_1 = \frac{1}{\eta_m} \Big|_{\alpha=\gamma=\theta=1}.$$

То есть A_1 - выражался бы через механический к.п.д., если номинальный режим считался бы при $\alpha = 1$.

С учётом приведённых замечаний два уравнения для определения коэффициентов A_0 и A_1 можно записать в виде:

$$\pi_{\text{мин}} \omega_{\text{мин}} = A_1 A_0 e^{1/e} \omega_{\text{мин}} / e - A_2,$$

$$A_1 A_0^{1/A_0} - A_2 = 1.$$

Исключая A_1 , получаем одно нелинейное уравнение относительно A_0 , которое элементарно решается методом половинного деления.

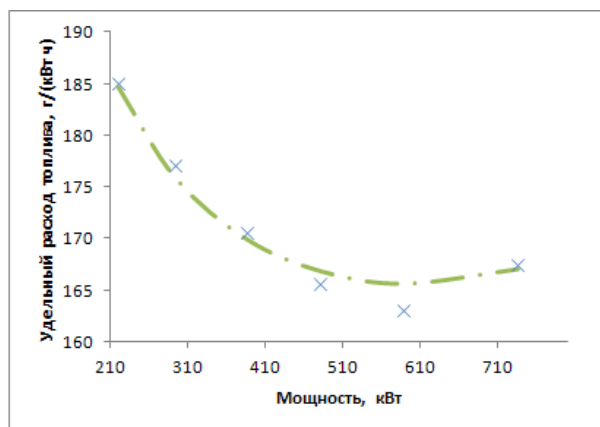


Рис. 2. Стеновая винтовая характеристика для дизеля 8NVD48A: штрих-пунктир - МАИК, x - данные испытаний

Таким образом, для работы МАИК требуется знать только номинальную эффективную мощность, которая будет увязываться с ходовыми характеристиками судна. Номинальный часовой расход топлива можно оценить, задав некоторое константное для разных двигателей значение эффективного к.п.д. на номинальном режиме. Очевидно, такой подход вписывается в рамки задачи обоснования новых судов.

На рис. 2 приводится расчёт винтовой характеристики дизеля 8NVD48A мощностью 736 кВт при 375 об/мин, а также стеновая винтовая характеристика для того же дизеля из [26]. Положение точки минимума было принято как $\omega_{\min} = 0,8$ и $\pi_{\min} = 0,7$.

Из рис. 2 можно видеть неплохое совпадение с фактической кривой, более чем достаточное для задач обоснования судов. Удовлетворительное

совпадение МАИК с опытными данными расхода топлива на мелководье следует также из рис. 1.

Обсуждение и выводы

Достоинством МАИК является потребность всего в одном абсолютном значении параметра двигателя, а также то, что у коэффициентов модели есть физический смысл, что позволяет их контролировать, исключать некорректные результаты, а также развивать этот метод. Но существуют и некоторые проблемы.

Во-первых, мощность механических потерь не является постоянной. В литературе можно найти несколько, весьма различных по результатам регрессий для вычисления давления механических потерь, как правило, в виде линейных функций от средней скорости поршня. Поскольку последняя прямо пропорциональна частоте вращения, то мощность механических потерь должна выражаться квадратичной функцией частоты вращения.

Например, в [27] даётся выражение для мощности механических потерь в виде:

$$N_m = An^w,$$

где коэффициенты A и w устанавливаются экспериментально, и для большинства дизелей $w = 1,6 \div 2,2$.

Ввести такое выражение в уравнения описанного выше метода не представляет никакого труда, но результаты аппроксимации становятся хуже.

Другая проблема, возможно, имеется в вычислении индикаторного к.п.д. Согласно [28, 29], последний зависит не только от коэффициента избытка воздуха, но и от других факторов. Добавление в уравнения метода дополнительных зависимостей, возможно, позволит улучшить аппроксимацию универсальных характеристик.

Литература

1. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании судов морского плавания. Л.: Судостроение, 1981. 280 с.
2. Платов А.Ю., Платов Ю.И., Иванов А.В., Малышкин А.Г. Моделирование судового дизеля для решения задач рейсового планирования и нормирования выбросов CO₂ речных грузовых судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. N 4 (42). Т.2. С. 42-49.
3. Шапошников Е.М. Автоматизация расчётов нормативов и показателей работы судов и составов при оптимальном планировании // Труды ЦНИИЭВТ. М.: Транспорт, 1969. Вып. 56. 136 с.
4. Шимко К.Н. Теплотехнические основы нормирования расхода топлива на речном транспорте. М.: Изд-во речного флота СССР, 1952. 324 с.
5. Самыкин Г.А. Исследование эксплуатационной экономичности главных двигателей речных теплоходов: дисс. ...канд. техн. наук. Горький, 1975. 183 с.
6. Alderton P. M. The optimum speed of ship // The Journal of Navigation. 1981. 34(3). P. 341–355.
7. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships // Journal of the Operational Research Society. 1982. 33(11). P. 1035–1040.
8. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004. 265 p.
9. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2017. 623 p.
10. Bialystocki N., Dimitris Konovessis D. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach // Journal of Ocean Engineering and Science. 2016. 1. P. 157–166.
11. Платов А.Ю., Гусева Ю.В. Эксплуатационный метод нормирования скорости и расхода топлива при автоматизированном планировании работы речных грузовых судов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 51. С. 130-142.
12. Пищаев А.М., Тумаринсон Е.М. Экономичные режимы движения судов // Речной транспорт. 1981. № 4. С. 39.
13. Mersin K., Alkan G., Mısırlıoğlu T. T. A new method for calculating fuel consumption and displacement of a ship in maritime transport // Cogent Engineering. 2017. 4(1). doi:10.1080 / 23311916.2017.1415107

14. Kowalski A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions // *Zeszyty Naukowe. Maritime University of Szczecin, Akademia Morska w Szczecinie*. 2013. 36(108). P. 94–99.
15. Schrady D.A., Smith G.K., Vassian R.B. Predicting Ship Fuel Consumption. Technical Report NPS-OR-91-03. Monterey, California: Naval Postgraduate School. 1996.
16. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1965. 544 с.
17. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей / В.Ю. Гиттис, В.А. Бондаренко, Т.П. Ефимов, Ю.Г. Поляков, Б.М. Чурбанов. М.: Транспорт, 1965. 376 с.
18. Звонов, В.А., Солодовник П.С., Фурса В.В. Методика построения многофакторных характеристик двигателей внутреннего сгорания // *Локомотивостроение*. 1975. Вып. 7. С. 126-131.
19. Планирование эксперимента при построении универсальных характеристик малооборотного дизеля / Ю.А. Пахомов, Д.Л. Хак, В.В. Роголев, Д.Н. Пирогов // *Двигателестроение*. 1981. № 8. С. 14–15.
20. Jahns G. Computer Simulation of Diesel Engine Performance // *Transactions of the ASAE*. 1990. V. 33, P. 764-770.
21. Goering C.E., Cho H. Engine model for mapping BSFC contours // *Mathematical and Computer Modeling*. 1988. 11. P. 514-518.
22. De Souza E. G., Milanez L. F. Efficiency analysis of diesel engines // *Trans. in Agric*. 1990. 33(1). P. 8-14.
23. Ручкин Ю.Н. Эффективность эксплуатационных режимов судовых гидромеханических комплексов: дисс. ... док. техн. наук. Н. Новгород, 2000. 393 с.
24. Портнов Д.А. Рабочий процесс авиадизеля при наддуве с использованием энергии выхлопных газов // *Труды ЦИАМ*. №141. М.: Оборонгиз, 1948. 41 с.
25. Платов А.Ю. Методы оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях. Н. Новгород: ВГАВТ, 2009. 155 с.
26. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. М.: Транспорт, 1980. 424 с.
27. Брук М.А., Рихтер А.А. Режимы работы судовых дизелей. Л.: Судпромгиз, 1963. 484 с.
28. Портнов, Д.А. Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия. М.: Машгиз, 1963. 640 с.
29. Ржепецкий К.Л., Рихтер А.А. Дизель в судовом пропульсивном комплексе. Л.: Судостроение, 1978. 254 с.

References

1. Kraev V.I. Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii sudov morskogo plavaniya [Economic feasibility in the design of marine ships]. L.: Sudostroenie, 1981, 280 s.
2. Platov A.Yu., Platov Yu.I., Ivanov A.V., Malyshev A.G. Modelirovanie sudovogo dizelya dlya resheniya zadach reysovogo planirovaniya i normirovaniya vybrosov SO2 rechnykh gruzovykh sudov [Marine diesel modeling for the problems of voyage planning and CO2 emissions regulations for river cargo ships]. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*, 2018, N 4 (42), T.2, S. 42-49.
3. Shaposhnikov E.M. Avtomatizatsiya raschetov normativov i pokazateley raboty sudov i sostavov pri optimal'nom planirovanii [Standards and performance indicators computation of ships and push-trains by optimal planning]. *Trudy TsNIEVT*, M.: Transport, 1969, Vyp. 56, 136 s.
4. Shimko K.N. Teplotekhnicheskie osnovy normirovaniya raskhoda topliva na rechnom transporte [Heat engineering basics of fuel consumptions standards in river transport]. M.: Izd-vo rechnogo flota SSSR, 1952, 324 s.
5. Samykin G.A. Issledovanie ekspluatatsionnoy ekonomichnosti glavnykh dvigateley rechnykh teplokhodov [The study of operational efficiency of the main engines of river ships]: diss. ... kand. tekhn. nauk, Gor'kiy, 1975, 183 s.
6. Alderton P. M. The optimum speed of ship. *The Journal of Navigation*, 1981, 34(3), P. 341–355.
7. Ronen D. Effect of oil price on the optimal speed of ships. *Journal of the Operational Research Society*, 1982, 33(11), P. 1035–1040.
8. Barras B. Ship design and performance for masters and mates. Oxford: Elsevier, 2004, 265 p.
9. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Ship Propulsive Power. Cambridge University Press, 2017, 623 p.
10. Bialystocki N., Dimitris Konovessis D. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2016, 1, P. 157–166.
11. Platov A.Yu., Guseva Yu.V. Ekspluatatsionnyy metod normirovaniya skorosti i raskhoda topliva pri avtomatizirovannom planirovanii raboty rechnykh gruzovykh sudov [The operational method of velocity and fuel consumption standards in the automated planning of the work of river cargo ships]. *Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta*, 2017, № 51, S. 130-142.
12. Pishchaev A.M., Tumarinson E.M. Ekonomichnye rezhimy dvizheniya sudov [Economic modes of ship traffic]. *Rechnoy transport*, 1981, № 4, S. 39.
13. Mersin K., Alkan G., Misirlioglu T. T. A new method for calculating fuel consumption and displacement of a ship in maritime transport. *Cogent Engineering*, 2017, 4(1), doi:10.1080 / 23311916.2017.1415107
14. Kowalski A. Cost optimization of marine fuels consumption as important factor of control ship's sulfur and nitrogen oxides emissions. *Zeszyty Naukowe. Maritime University of Szczecin, Akademia Morska w Szczecinie*, 2013, 36(108), P. 94–99.
15. Schrady D.A., Smith G.K., Vassian R.B. Predicting Ship Fuel Consumption. Technical Report NPS-OR-91-03. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1996.
16. Vansheydt V.A. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya [Marine internal combustion engines]. L.: Sudostroenie, 1965, 544 s.

17. Teoreticheskie osnovy ekspluatatsii sudovykh dizeley [Theoretical basics of the operation of marine diesel engines]. V. Yu. Gittis, V. A. Bondarenko, T. P. Efimov, Yu. G. Polyakov, B. M. Churbanov. M.: Transport, 1965, 376 s.
18. Zvonov, V. A., Solodovnik P. S., Fursa V. V. Metodika postroeniya mnogofaktornykh kharakteristik dvigateley vnutrennego sgoraniya [The method of calculation of multifactor characteristics for internal combustion engines]. *Lokomotivostroenie*, 1975, Vyp. 7, S. 126-131.
19. Planirovanie eksperimenta pri postroenii universal'nykh kharakteristik malooborotnogo dizelya [Experiment planning for calculation of performance contours of a low-speed diesel]. Yu. A. Pakhomov, D. L. Khak, V. V. Rogalev, D. N. Pirogov. *Dvigatelistroenie*, 1981, № 8, S. 14–15.
20. Jahns G. Computer Simulation of Diesel Engine Performance. *Transactions of the ASAE*, 1990, V. 33, P. 764-770.
21. Goering C. E., Cho H. Engine model for mapping BSFC contours. *Mathematical and Computer Modeling*, 1988, 11, P. 514-518.
22. De Souza E. G., Milanez L. F. Efficiency analysis of diesel engines. *Trans. in Agric*, 1990, 33(1), P. 8-14.
23. Ruchkin Yu. N. Effektivnost' ekspluatatsionnykh rezhimov sudovykh gidromekhanicheskikh kompleksov [Operational efficiency of ships hydromechanical complexes]: diss. ... dok. tekhn. nauk. N. Novgorod, 2000. 393 s.
24. Portnov D. A. Rabochiy protsess aviadizelya pri nadduve s ispol'zovaniem energii vykhlopnykh gazov [Workprocess of a aviation supercharged diesel engine using exhaust energy]. *Trudy TsIAM*, №141, M.: Oborongiz, 1948, 41 s.
25. Platon A. Yu. Metody operativnogo planirovaniya raboty rechnogo gruzovogo flota v sovremennykh usloviyakh [Methods of operational planning of the work of the river cargo fleet in modern conditions]. N. Novgorod: VGAVT, 2009, 155 s.
26. Rukovodstvo po teplotekhnicheskomu kontrolyu seriynykh teplokhodov [Guidelines for the heat engineering control of serial motor ships]. M.: Transport, 1980, 424 s.
27. Bruk M. A., Rikhter A. A. Rezhimy raboty sudovykh dizeley [Operating modes of marine diesel engines]. L.: Sudpromgiz, 1963, 484 s.
28. Portnov, D. A. Bystrokhodnye turboporshnevye dvigateli s vosplamneniem ot szhatiya [Compression ignition turbo piston engines]. M.: Mashgiz, 1963, 640 s.
29. Rzhepetskiy K. L., Rikhter A. A. Dizel' v sudovom propul'sivnom komplekse [Diesel in the ship propulsion complex]. L.: Sudostroenie, 1978, 254 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Юрьевич Платов, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики, Нижегородский архитектурно-строительный университет, 603950, Н.Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: platoff@mail.ru

Юрий Иванович Платов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: platov1@yandex.ru

Оксана Юрьевна Васильева, аспирант кафедры Управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vasilieva_ox@mail.ru

Alexander J. Platov, Dr. Sci. (Eng), head of Applied Informatics and Statistic Chair, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 603950, Nizhny Novgorod, Ilyinskaya st., 65 e-mail: platoff@mail.ru

Juri I. Platov, Dr. Sci. (Eng), professor of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5 e-mail: platov1@yandex.ru

Oksana J. Vasileva, Graduate student of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5 e-mail: vasilieva_ox@mail.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 621.371

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.018

Автоматизированная сеть сбора данных о техническом состоянии средств навигационного оборудования на радиоперелиниях метеорной связи в Арктике

В.Л. Мартынов¹, И.О. Щербак¹, С.В. Воронин²¹ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова²Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

Аннотация. В соответствии с государственной стратегией по освоению северных территорий вопросы, связанные с обеспечением безопасности функционирования Северного морского пути, определяют одно из новых актуальных направлений для проведения научных исследований. Известно, что организация транспортно-технологического процесса в арктическом регионе при наличии тяжелых гидрометеорологических условиях не возможна без новейших систем передачи информационных данных на большие расстояния. В статье приводятся предложения по организации сбора информационных данных с удаленных объектов, расположенных в труднодоступных районах Арктики, для обеспечения нормального функционирования системы управления движением судов в указанном регионе. Для решения задачи осуществления дистанционного мониторинга работоспособности технических средств навигационного оборудования предложено использовать автоматическую передачу данных по радиоперелиниям метеорной связи, охватывающих всю трассу Северного морского пути. В качестве одного из методов увеличения пропускной способности сети метеорной связи, что дает возможность повысить ее эффективность и одновременно расширить функциональные возможности, рекомендовано применить адаптацию вида манипуляции к уровню мощности сигнала на входе приемного устройства.

Ключевые слова: мониторинг, навигационное оборудование, радиоперелиния метеорной связи, топология, сеть метеорной связи, метеорный след, энергетический контакт, пропускная способность, фазовая манипуляция.

Automated network for collection of data on technical condition of navigation equipment at meteorological communication radio lines in the Arctic

Victor L. Martynov¹, Irina O. Shcherbakova¹, Sergey V. Voronin²¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia²Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

Abstract. In accordance with the state strategy of development of Northern territories, the issues related to the safe operation of the Northern sea route define one of the new topical areas for research.

It is known that the organization of transport-technological process in the Arctic region in the presence of severe hydrometeorological conditions is not possible without advanced systems of information data transmission over long distances. The article presents suggestions for organizing the collection of information from remote sites located in remote areas of the Arctic to ensure the normal functioning of vessel traffic management in the region. To solve the problem of the remote monitoring of the technical means of navigation performance it is proposed to use automatic data transfer via radio links of meteor communications, covering the whole Northern sea route. As one of the methods for increasing bandwidth capacity network of meteor communications, which gives the opportunity to increase its efficiency and at the same time to extend the functionality, it is recommended to use adaptation of the kind of manipulation to the power level of the input signal of the receiver.

Keywords: monitoring, navigation equipment, meteor communication radio line, topology, meteor communication network, meteor trace, energy contact, bandwidth capacity, phase manipulation.

Введение

Развитие арктического региона России сегодня невозможно представить без современной развитой транспортной инфраструктуры. Использование и поиск полезных ископаемых в арктическом шельфе определили одно из основных направлений – развитие судоходства в данном регионе, которое требует специального технического оснащения для обеспечения безопасности мореплавания как судов, так и берегового сегмента. Решением здесь может выступить создание разветвленной информационной телекоммуникационной сети, которая позволит осуществлять информационный обмен данными во всех, в том числе, и удаленных точках Арктики. Но, на сегодняшний день, такая сеть находится в стадии разработки, к тому же, на ее

запуск и эксплуатацию потребуются немалые средства, что довольно ощутимо для государственной казны. Так как ключевую функцию по обеспечению безопасности судоходства в Арктике, в частности, Северного морского пути, выполняет система управления движением судов (СУДС), именно она должна быть в первую очередь оснащена новейшим современным оборудованием, способным сохранять высокую степень работоспособности при воздействии на него сурового климата Крайнего Севера.

Транспортно-технологический процесс Северного морского пути происходит в сложных гидрометеорологических условиях, в которых СУДС должна нормально функционировать. Поскольку технические средства навигационного оборудования (ТСНО) находятся на значительных расстояниях (до

1500-2000 км) от головного сервера, расположенного в морском спасательно-координационном центре, требуется постоянное получение данных о состоянии их работоспособности, которое на сегодняшний день практически невозможно без сложных, обладающих высокой производительностью и одновременно дорогостоящих сетей передачи данных [1, 2].

Первой ступенью к развитию инфраструктуры телекоммуникаций в Арктике может стать создание автоматизированных сетей сбора данных от удаленных средств навигации для СУДС на базе радиолиний метеорной связи (РМС). Такого рода радиолинии в мировой практике зарекомендовали себя как недорогой вид связи для сетей с низкой скоростью трафика. С появлением высокоскоростных процессоров и относительно дешевых запоминающих устройств такой вид связи все чаще стал привлекать разработчиков наземных радиотехнических систем. Несмотря на все преимущества систем спутниковой связи, они имеют ограниченную живучесть, низкую помехозащищенность радиоканалов, относительно сложны в плане реализации, при этом требуют больших материальных затрат на эксплуатацию. Поэтому, использование наземных комплексов радиосвязи в данном случае гораздо предпочтительнее [3-5].

1. Принцип организации связи на РМС

Процесс функционирования РМС основан на использовании так называемого «космического мусора» – метеоров. Ежедневно большое количество метеоров небольшой массы попадает в атмосферу Земли. Область концентрации метеоров находится, как правило, на высоте 95–115 км от поверхности Земли, поэтому благодаря такой геометрии можно установить связь между двумя корреспондентами на расстоянии около 2000 км друг от друга. Метеоры в атмосфере сталкиваются с молекулами воздуха и ионизируются в виде длинных тонких параболоидов с метеорной частицей в головной части, то есть метеорных следов, которые способны отражать радиосигналы в диапазоне радиочастот УКВ-диапазона 30–100 МГц. Плотность линий электронов, образующихся в метеорных следах, будет изменяться в зависимости от массы метеорной частицы. Как правило, чем тяжелее частица, тем плотнее электронное облако, тем больше времени требуется для диффузии следа. Более высокая плотность следа также означает более сильную отраженную радиоволну на приеме. Метеорные следы существуют двух видов, в зависимости от плотности электронных линий: следы, имеющие плотность электронных линий более $2 \cdot 10^{14}$ эл/м, называются насыщенными, а те, у которых плотность ниже этой граничной величины, называются ненасыщенными. При этом реальный принятый отраженный от метеорного следа сигнал соответственно принимает и разную форму. На рисунке 1 представлены осциллограммы, показывающие форму сигналов, поступивших на вход приемного устройства, при использовании отражений от ненасыщенных и насыщенных метеорных следов [6].



Рис. 1 – Пример осциллограмм отраженных от метеорных следов сигналов на входе приемного устройства

Процесс отражения радиосигнала УКВ-диапазона от метеорных следов представлен на рисунке 2.

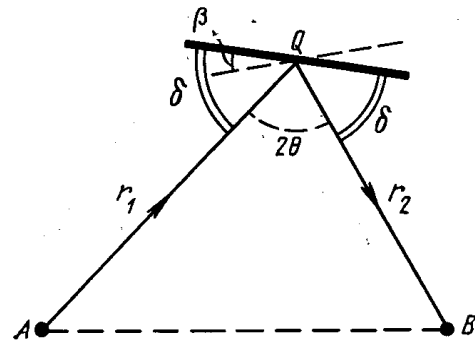


Рис. 2 – Геометрией отражения УКВ-радиосигнала от метеорного следа

Здесь A и B – передающая и приемная станции метеорной связи, r_1 и r_2 – расстояния от пунктов связи до точек отражения УКВ-радиосигнала на метеорном следе.

При ненасыщенном следе радиоволна проникает в его толщу и в создании вторичного излучения принимают участие все свободные электроны. Множитель ослабления при отражении от такого следа $V_{нн}$ при неизменной начальной линейной электронной плотности описывается выражением:

$$V_{нн} \approx 0,32 \left(\frac{\mu_0 e^2}{4m} \right) \frac{(r_1 + r_2) \lambda \sin^2 \gamma}{r_1 r_2 (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \theta)} \alpha_e^2, (1)$$

где β – угол между осью метеорного следа и плоскостью AQB, μ_0 – магнитная проницаемость среды (свободного пространства), m и e – масса и заряд электрона соответственно, α_e – начальная линейная плотность электронов, γ – угол между вектором электрического поля и направлением отражения, θ – половина угла в плоскости AQB.

При наличии в ионосфере насыщенного следа, множитель ослабления V_n можно определить по следующей формуле:

$$V_n \approx 0,21 \sqrt{\frac{\mu_0 e^2}{4m}} \frac{(r_1 + r_2) \lambda \sin^2 \gamma}{r_1 r_2 (1 - \cos^2 \beta \sin^2 \theta)} \alpha_e^2, (2)$$

Формулы (1) и (2) можно применить только лишь исходя из условия, что линейная плотность электронов α в точке отражения есть величина

постоянная. На практике, из-за диффузии метеорный след меняет свои размеры (расширяется), и мощность принимаемого сигнала, соответственно, падает. Поэтому в данные формулы для точности расчетов потребуется вводить специальные множители.

Зависимость уровня мощности принимаемого сигнала от времени $P_{вх}(t)$ можно обозначить как функцию от времени:

$$P_{вх}(t) = P_{вх}(0) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

где τ – постоянная времени, рассчитываемая по формуле:

$$\tau = \frac{\lambda^2 \sec^2 \theta}{32\pi^2 D}, \quad (4)$$

Здесь λ – длина волны, θ – половинный угол отражения радиосигнала от метеорного следа, $D = 1 \div 10 \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент диффузии.

Зависимость $P_{вх}(t)$ при наличии насыщенного метеорного следа носит несколько другой характер:

$$P_{вх}(t) = A \sqrt{tD \ln \frac{\tau'}{t}}, \quad (5)$$

где A – линейный коэффициент пропорциональности, а длительность всплеска отраженного сигнала τ' определяется формулой:

$$\tau' = \frac{10^{-7} e^2 \alpha \lambda^2 \sec^2 \theta}{4m\pi^2 D}, \quad (6)$$

где α – линейная плотность электронов.

Случайный характер метеорных следов характеризуется случайными моментами появления всплесков от сгорания метеоров, случайной величиной массы метеора, направлением его движения, химическим составом вещества метеора. Такая многопараметрическая зависимость отражающей способности метеорного следа усложняет математическое описание процесса отражения УКВ и, как следствие, процесса передачи данных по РМС. После всплески и образования электронного облака начинается постепенная деградация отражающей способности этого следа, интенсивность и длительность которой зависит от множества различных случайных процессов, происходящих в ионосфере [7]. После того, как электроны и ионы восстановятся в виде молекул, отражение УКВ-радиосигналов прекратится.

Поскольку метеоры с относительно большой массой (свыше 100 мг) появляются в ионосфере очень редко, то для обоснования возможности использования следов от них с целью передачи данных использовать их весьма проблематично. Поэтому основной интерес при передаче данных по РМС представляют метеоры массой от 50 до 100 мг, оставляющие в ионосфере насыщенные следы. Именно они способны обеспечить устойчивую и качественную связь между корреспондентами.

2. Принципы построения сети на РМС

Метеорная связь, выступающая в роли системы дистанционного мониторинга средств навигационного оборудования, обладает одновременно несколькими преимуществами:

- устойчивостью к ионосферным возмущениям;
- высокой степенью помехозащищенности и скрытности;
- простотой реализации на труднодоступных необслуживаемых объектах Арктики.

Сеть метеорной связи способна выполнять целый ряд функций, а именно:

- автоматический дистанционный сбор данных от удаленных объектов;
- автоматический контроль состояния территориально-распределенных телекоммуникационных систем большой протяженности;
- резервирование действующих в северных широтах систем передачи информационных данных.

РМС представляет собой направляющую среду тракта передачи данных между удаленными корреспондентами (рис. 3). Одним из важнейших параметров, характеризующих качество РМС с точки зрения автоматизированных систем управления, является значение длительности энергетических контактов между корреспондентами для осуществления передачи данных, которое зависит от частоты появления метеоров в ионосфере, оставляющих следы, пригодных для установления связи. Следует также отметить, что чем меньше потери при распространении УКВ-радиосигнала, которые могут быть частично скомпенсированы различными схемотехническими решениями аппаратной реализации приемного оборудования РМС, тем больше отводится времени для передачи информации. Другой не менее важный параметр – это длительность интервалов между появлениями пригодных для связи следов. Последний параметр особенно важен для СУДС в морских портах при проводке судов по территории портов со сложным рельефом.



Рис. 3 – Радиопуть метеорной связи (РМС)

Принцип функционирования РМС следующий. Для обмена данными необходимы ведущая и ведомая станции (рис. 3), которые содержат в себе передатчик мощностью до 5 кВт и приемник. Передатчики обеих станций непрерывно излучают немодулированный сигнал, сканирующий ионосферу на частотах УКВ-диапазона, а приемники в данный момент находятся в режиме ожидания. При превышении порогового уровня мощности сигнала (порогового соотношения сигнал/помеха), управляющее устройство выдает команду на

включение передатчика своей станции, то есть на начало передачи информации от одной станции к другой, которая будет происходить до момента падения мощности входного сигнала ниже заданной пороговой величины. Следует отметить, что отношение сигнал/помеха является также функцией мощности передатчика и коэффициента усиления антенны. Далее информация поступает в накопители и считывается с них ЭВМ.

Сети метеорной связи обладают и таким полезным качеством, как одновременная работа на одних и тех же частотах при условии соблюдения разных направлений связи, не создавая помех друг другу. Поэтому каждая из подсетей является независимой по отношению к другой. Один из вариантов топологии сети, включающий в себя главный сервер, отвечающий за весь цикл мониторинга, и три подсети на базе РМС, ведомые станции которых расположены в труднодоступных зонах Арктики, представлен на рис. 4 [8].

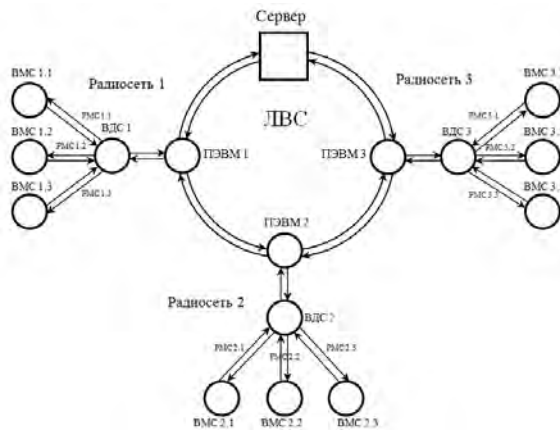


Рис. 4 – Топология телекоммуникационной сети метеорной связи

В совокупности с главным сервером, регулирующим работу всех радиосетей, ведущие станции (ВДС) образуют локально-вычислительную сеть (ЛВС). Как видно из рис. 4, взаимодействие ведущих станций с ведомыми (ВМС) реализовано при помощи топологии типа «звезда». Как показывает практика, количество ведомых станций по отношению к ведущей, как правило, не превышает 200.

3. Пропускная способность сети на РМС

Среди недостатков метеорной связи можно выделить наличие прерываний в радиосвязи, которые определяются случайным появлением метеоров в ионосфере и случайной длительностью существования метеорного следа. Для установления устойчивой передачи информации по РМС требуется определенное время существования энергетического контакта между корреспондентами, минимальное значение которого t_{\min} составляет [9]:

$$t_{\min} = K \cdot n \cdot t_j, j = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где K – число содержащихся в сообщении кодовых блоков;

n – число символов, которое содержится в одном отдельно взятым кодовом блоке;

t_j – временной интервал, занимаемый одним i -ым символом кодового блока, с.

Величина t_j определяется видом манипуляции, шириной частотного спектра радиоканала и особенностями распространения радиоволн по РМС.

Для обеспечения нормального функционирования РМС при использовании ее в телекоммуникационной сети, являются:

1. Необходимость обеспечения неискаженной передачи потоков информационных данных без потерь и посторонних вставок отдельных знаков (байтов).

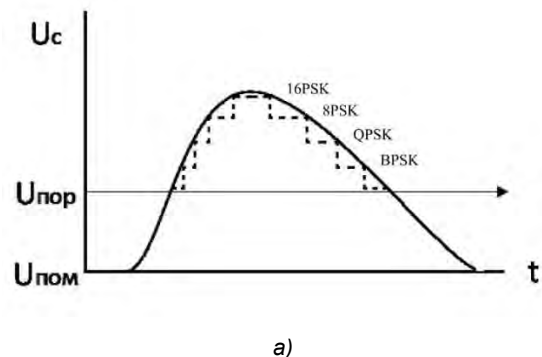
2. Выполнение требований по обеспечению идентификации корреспондентов в радиосети общего пользования.

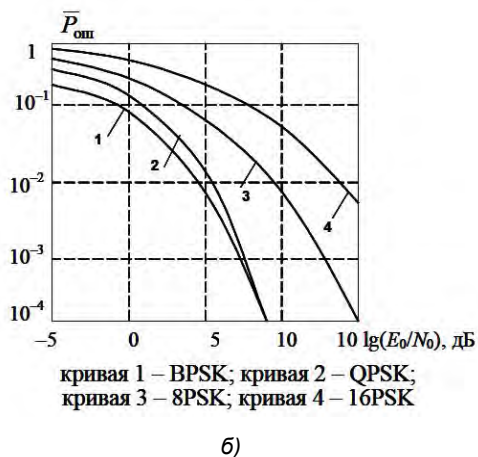
3. При использовании РМС в сети общего доступа необходимо

предусмотреть технологию разрешения конфликтных ситуаций, возникающих при одновременном выходе на связь нескольких корреспондентов.

Решение всего комплекса указанных задач требует значительного увеличения информационных ресурсов, что существенно сокращает информационную пропускную способность РМС, а также усложняет алгоритмы функционирования сети.

Хотя РМС имеют низкую пропускную способность и длительное время ожидания из-за присущего каналу характера, пропускная способность системы может быть значительно улучшена с помощью передачи данных с переменной скоростью [10]. Для этого предлагается применить процесс динамического изменения скорости передачи символов многоуровневой фазовой манипуляции PSK от уровня принимаемого сигнала (для примера, 64 кбит/с → 32 кбит/с → ... → 2 кбит/с и т. д.). Однако, изменение скорости передачи символов в сторону увеличения требует расширения отведенной для связи полосы частот. Для исключения данного фактора весь процесс передачи программно контролируется в программном модеме, изменяя количество фаз в манипуляции PSK и поддерживая при этом постоянную скорость передачи символов.





б)

Рис. 5 – Передача данных с применением адаптивной манипуляции (а) и зависимость вероятности ошибки передаваемых данных от соотношения сигнал/помеха при разных видах манипуляции (б)

Примечание. На рис. 4 (а): U_c – уровень отраженного УКВ-радиосигнала, $U_{пор}$ – пороговое значение начала и конца энергетического контакта между корреспондентами, $U_{пом}$ – уровень помех.

На рис. 4 (б): BPSK – двоичная фазовая манипуляция, QPSK – четырехпозиционная фазовая манипуляция, 8PSK – восьмипозиционная фазовая манипуляция, 16PSK – шестнадцатипозиционная фазовая манипуляция, $\frac{E_0}{N_0}$ – соотношение

сигнал/помеха, $P_{ош}$ – вероятность появления ошибочного бита информации на приеме.

Применение данного подхода к реализации РМС однозначно ведет к увеличению их пропускной способности, а, следовательно, и всей сети метеорной связи в целом.

Заключение

1. С учетом требований к построению сетей передачи данных в северных районах предложено для дистанционного контроля работоспособности технических средств навигационного оборудования применить в арктической зоне России метеорную связь, которая является одним из перспективных статистически устойчивых видов связи с разнесенными на расстояние 1500-2000 км от центра сбора данных терминалами. Соответственно, сеть на радиоперелиниях метеорной связи может на начальном этапе являться составляющей территориально-распределенной информационной телекоммуникационной сети, функционирующей в тяжелых климатических условиях в Арктике для повышения эффективности функционирования Северного морского пути.
 2. Оценены возможности сети метеорной связи по осуществлению мониторинга работоспособности технических средств навигационного оборудования системы управления движением судов Северного морского пути.
 3. С целью получения требуемого качества потока передаваемых данных по радиоперелинии метеорной связи обоснована целесообразность использования для установления энергетического контакта между удаленными объектами насыщенного метеорного следа.
 4. Показано, что для увеличения пропускной способности сети метеорной связи, рационально использовать метод адаптации вида манипуляции в соответствии с изменением уровня мощности полезного сигнала на входе приемного устройства.
- Таким образом, организация распределенной сети мониторинга технических средств навигационного оборудования СУДС в Арктической зоне, основанной на радиоперелиниях метеорной связи, создаст фундамент к переходу на качественно новый уровень обеспечения безопасности функционирования Северного морского пути.

Литература

1. Дорошенко В.И., Стратонова О.Н., Пивоварова А.К. Метеорная связь в районах Крайнего Севера России // Материалы IV Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов (Санкт-Петербург, Россия, 14 мая 2015 года). Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. СПб.: ГУМРФ, 2015. – С. 31–33.
2. Ксенофонтов Ю.Г., Воронин С.В., Скрипник И.Л. Вопросы использования сети метеорной связи в системе управления движением судов Северного морского пути // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2019. – С. 137-145.
3. Титков С.Б. Технические предложения по использованию метеорной связи // Защита информации. Инсайд. – СПб.: Издательский дом «Афина». 2006. № 3(9).
4. Карпов А.В., Сидоров В.В., Сулимов А.И. Метеорная генерация секретных ключей шифрования для защиты открытых каналов связи // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 3.
5. Качнов А.И., Пенкин А.А., Рыбаков А.В. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 2016. – С. 177-181.

6. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г. Применение метеорной связи в системах обеспечения безопасности объектов инфраструктуры Северного морского пути // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2019. № 1–2(127–128). – С. 3–11.
7. Капралов Д.Д., Кирик Д.И. Стохастическая модель метеорного радиоканала // Труды учебных заведений связи. – СПб.: СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. 2018. Т. 4. № 3.
8. Ксенофонтов Ю.Г., Скрипник И.Л., Воронин С.В. Радиолинии метеорной связи в информационно-телекоммуникационной инфраструктуре МЧС России Арктического региона // Проблемы управления рисками в техносфере: научно-аналитический журнал. – СПб. 2019. № 3 (51). – С. 6-12.
9. Ксенофонтов Ю.Г., Дорошенко В.И., Пивоваров А.Н. Повышение информационной безопасности каналов мониторинга в сетях метеорной связи Арктики России // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. – С. 41-48.
10. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г., Скрипник И.Л. Телекоммуникационный ресурс инфотелекоммуникационной сети метеорной связи Арктики России // Научно-аналитический журнал. Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 1. 2020. – С.45-55.

References

1. Doroshenko V.I., Stratonova O.N., Pivovarova A.K. Meteornaya svyaz' v rajonax Krajnego Severa Rossii [Meteor connection in the Far North of Russia] // Materialy' IV Mezhdvuzovskoj nauchno-prakticheskoj konferencii aspirantov, studentov i kursantov (Sankt-Peterburg, Rossiya, 14 maya 2015 goda). Sovremennyy'e tendencii i perspektivy' razvitiya vodnogo transporta Rossii. SPb.: GUMRF, 2015. – S. 31–33.
2. Ksenofontov Yu.G., Voronin S.V., Skripnik I.L. Voprosy' ispol'zovaniya seti meteornoj svyazi v sisteme upravleniya dvizheniem sudov Severnogo morskogo puti [Issues related to the use of the meteor network in the traffic management system of Northern Sea Route vessels] // Sbornik nauchny'x statej nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova». – SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2019. – S. 137-145.
3. Titkov S.B. Texnicheskie predlozheniya po ispol'zovaniyu meteornoj svyazi [Technical proposals for the use of meteor communication] // Zashhita informacii. Insajd. – SPb.: Izdatel'skij dom «Afina». 2006. № 3(9).
4. Karpov A.V., Sidorov V.V., Sulimov A.I. Meteornaya generaciya sekretny'x klyuchej shifrovaniya dlya zashhity' otkry'ty'x kanalov svyazi [Meteor generation of private encryption keys for protection of open communication channels] // Informacionny'e tehnologii i vy'chislitel'ny'e sistemy'. 2008. № 3.
5. Kachnov A.I., Penkin A.A., Ry'bakov A.V. Razrabotka mobil'noj sistemy' informacionnogo obespecheniya s ispol'zovaniem kanalov meteornoj svyazi [Development of a mobile information system using meteor links] // Aktual'ny'e problemy' infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii. Sbornik nauchny'x statej V mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj i nauchno-metodicheskoj konferencii, SPbGUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, Sankt-Peterburg, 2016. – S. 177-181.
6. Doroshenko V.I., Ksenofontov Yu.G. Primenenie meteornoj svyazi v sistemax obespecheniya bezopasnosti ob`ektov infrastruktury' Severnogo morskogo puti [Application of meteor communications in the security systems of Northern Sea Route infrastructure] // Voprosy' obronnoj texniki. Seriya 16: Texnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. Seriya 16. 2019. № 1–2(127–128). – S. 3–11.
7. Kapralov D.D., Kirik D.I. Stoxasticheskaya model' meteornogo radiokanala [Stochastic model of meteor radio channel] // Trudy' uchebny'x zavedenij svyazi. – SPb.: SPbGUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha. 2018. Т. 4. № 3.
8. Ksenofontov Yu.G., Skripnik I.L., Voronin S.V. Radiolinii meteornoj svyazi v informacionno-telekommunikacionnoj infrastrukture MChS Rossii Arkticheskogo regiona [Meteor Communication Radio Lines in Information and Telecommunication Infrastructure of the Russian Emergencies Ministry of the Arctic Region] // Problemy' upravleniya riskami v tehnosfere: nauchno-analiticheskij zhurnal. – SPb. 2019. № 3 (51). – S. 6-12.
9. Ksenofontov Yu.G., Doroshenko V.I., Pivovarov A.N. Povy'shenie informacionnoj bezopasnosti kanalov monitoringa v setyax meteornoj svyazi Arktiki Rossii [Improving information security of monitoring channels in meteor communication networks of the Arctic of Russia] // Problemy' informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternyye sistemy'. 2019. № 3. – S. 41-48.
10. Doroshenko V.I., Ksenofontov Yu.G., Skripnik I.L. Telekommunikacionny'j resurs infotelekkommunikacionnoj seti meteornoj svyazi Arktiki Rossii [Telecommunication resource of the information and telecommunications network of meteor communication of the Arctic of Russia] // Nauchno-analiticheskij zhurnal. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. Т. 16. № 1. 2020. – S.45-55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Леонидович Мартынов, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Victor L. Martynov, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Ирина Олеговна Щербакова, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой Английского языка навигации и связи, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: irinashcherbakova@yandex.ru

Irina O. Shcherbakova, Ph.D. (Ped.), Associate Professor, Head of the Department of English Navigation and Communication Language, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: irinashcherbakova@yandex.ru

Сергей Владимирович Воронин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Пожарной безопасности технологических процессов и производств, 196105, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149, e-mail: wsw1@yandex.ru

Sergey V. Voronin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, 196105, Russian Federation, e-mail: wsw1@yandex.ru

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.891; 658.588; 658.51; 658.562

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.019

Интегрированный подход к исследованию рисков в области экологической и пожарной безопасности портовых технологических комплексовД.А. Скороходов^{1,2}, И.В. Степанов³, С.Н.Турусов⁴, В.В. Ященко², С.П.Хабаров⁵

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³ООО «Научно-технический центр «Технологии и безопасности», ⁴ Акционерное общество «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения», ⁵ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова

Аннотация. В работе исследуется возможность интеграции различных инструментов анализа рисков с целью повышения эффективности исследования экологических, технологических и пожарных рисков портовых технологических комплексов (ПТК). Рассматривается возможность совместного применения таких инструментов исследования рисков как: исследование опасности и работоспособности (HAZOP), анализ видов и последствий отказов (FMEA), предварительный анализ опасностей (HAZID), анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie) и анализ первопричины (RCA).

Рассмотрены наиболее рациональные методы исследования влияния внешних и внутренних причин функционирования ПТК на возникновение экологических, технологических и пожарных рисков. Показано, что совместное использование инструментов анализа риска может дать синергетический эффект и позволяет повысить результативность систем, решающих задачи обеспечения безопасного функционирования ПТК. Предложен алгоритм интеграции инструментов исследования рисков ПТК, возникновение которых обусловлено влиянием внутренних причин. Предложенный в работе подход к интеграции инструментов исследования рисков создает условия для разработки прикладных систем поддержки принятия решений, которые реализуют управление на основе рисков, что позволяет практически реализовать концепции риск-ориентированного управления в сфере транспортной, экологической и пожарной безопасности.

Ключевые слова: исследование рисков, интегрированный подход, анализ риска, метод HAZOP, метод HAZID, метод FMEA, метод Bow-Tie, метод RCA.

Integrated approach to the research of risks in the field of ecological and fire safety of port technology complexesDmitriy A. Skorohodov^{1,2}, Ilya V. Stepanov³, Sergey N. Turusov⁴, Vladimir V. Yashchenko², Sergei P. Khabarov⁵

¹Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, ²Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, ³LLC "Scientific and Technical Center" Technology and Security", ⁴JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM), ⁵St. Petersburg State Forest Technical University

Abstract. In work the ability to integrate different instruments of risk analysis for the purpose of increase in efficiency of the research of environmental, technological and fire risks of the port technology complexes (PTC) is investigated. The possibility of combined use of such tools of the research of risks as is considered: research of danger and working capacity (HAZOP), analysis of types and effects of failures (FMEA), preliminary analysis of dangers (HAZID), analysis of Bow-Tie and analysis of the prime cause (RCA). The most rational methods of the research of influence of the external and internal reasons of functioning of PTC on emergence of environmental, technological and fire risks are considered. It is shown that sharing of instruments of risk analysis can give synergy effect and allows to increase effectiveness of the systems solving problems of ensuring safe functioning of PTC. The algorithm of integration of tools of the research of risks of PTC which emergence is caused by influence of the internal reasons is offered. The approach to integration of tools of the research of risks offered in work creates conditions for development of applied decision making support systems which implement management on the basis of risks that the risk - the oriented management in the field of transport, ecological and fire safety allows to implement practically concepts.

Key words: research of risks, integrated approach, risk analysis, HAZOP method, HAZID method, FMEA method, Bow-Tie method, RCA method.

Введение

Современный уровень развития техники и технологий отражает ряд глубинных противоречий между возможностями техники и человека, а также между безопасностью и эффективностью осуществления технологических процессов.

С одной стороны, развитие техники, технологий и средств автоматизации позволяет существенно снизить риски возникновения опасных состояний и аварийных ситуаций. С другой стороны, усложнение

технологических процессов, комплексов оборудования и систем управления приводит к изменению роли человека с активной (реальное управление процессами) на пассивную (наблюдение и вмешательство при отклонениях), а также к снижению способности человека к адекватному, полному и своевременному восприятию потенциально опасных процессов.

В процессе функционирования любая организация, так или иначе, сталкивается с различными видами рисков. Еще в большей степени

сказанное относится к организациям, деятельность которых связана с эксплуатацией портовых технологических комплексов (далее – ПТК) и их инфраструктуры.

Здесь под ПТК понимается совокупность перегрузочных комплексов, пассажирских терминалов и комплексов по обслуживанию флота с их акваториями, входящих в состав порта. А под инфраструктурой ПТК понимается совокупность объектов на территории и акватории порта, обеспечивающих возможность использования ПТК по назначению [1].

Принятие решений по управлению ПТК, зачастую, связано с наличием существенных неопределенностей и неполнотой знания о протекающих процессах.

При этом, ПТК функционирует зачастую в агрессивной для нее внешней среде, воздействие которой способствует возникновению в системе различных опасных состояний (например, влияние различных природных явлений). Технологические процессы, протекающие в ПТК, составные части ПТК, их взаимодействия и противодействия формируют внутреннюю среду, которая также может являться источником возникновения в потенциальных угроз и опасных состояний, то есть источником рисков.

В современном менеджменте принято определять риск как влияние неопределенности на цели [2]. При этом, под влиянием понимается отклонение от ожидаемого состояния, а под неопределенностью понимают полное или частичное отсутствие информации, которая необходима для понимания происходящих процессов и событий, а также их последствий и их вероятностей.

В сложившейся практике управления под риском, обычно понимают негативный характер отклонений, следствием которого могут стать ущерб, угроза или опасность, забывая при этом, что риск может иметь и положительный характер, следствием чего являются прибыль, успех или безопасность ПТК. На практике риск обычно рассматривается как сочетание вероятности или частоты проявления опасного события (отклонения, инцидента или аварии) и последствий этого события.

С учетом описанной специфики ПТК, для формирования целостной картины всех возможных в системе угроз и опасных состояний, требуется анализировать риски, обусловленные влиянием внешней и внутренней среды, техники, человека, инфраструктуры, а также всех присущих системе связей интерфейсов.

В настоящее время государственная политика РФ направлена на внедрение риск-ориентированных подходов при организации государственного контроля (надзора) в различных сферах деятельности, в том числе в сфере промышленной и пожарной безопасности. Кроме того, с начала 2000-х годов в РФ успешно внедряются элементы риск-ориентированных подходов для оценки и обоснования безопасности опасных производственных объектов. При этом в большинстве организаций, в том числе и в организациях, эксплуатирующих ПТК, риск-ориентированный подход постепенно становится основой для оценки, планирования и управления различными аспектами деятельности организации.

В настоящей работе рассматривается методика реализации интегрированного подхода к исследованию экологических, технологических и пожарных рисков ПТК с использованием таких инструментов исследования риска как «Исследование опасности и работоспособности» (HAZOP) [3, 4], «Анализ видов и последствий отказов» (FMEA) [3, 5], «Предварительный анализ опасностей» (PHA или HAZID) [3], «Анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie) [3] и «Анализ первопричины» (RCA) [3].

1. Проблема выбора инструментов для исследования рисков

В прошедшее десятилетие сформирована внушительная методическая и инструментальная база для проведения исследований риска. Здесь и далее под термином «исследование риска» понимается совокупность мероприятий по идентификации, анализу и оцениванию риска, а также поиск мер, направленных на снижение риска.

В частности, для проведения работ по анализу рисков в ПТК в качестве инструментальной базы используются такие документы как национальные стандарты (ГОСТ Р) серий 31000 [2, 3], 51901 [4, 5], 61508, 61511, 51814 [6] и ряд других, а также Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (утверждено приказом Ростехнадзора № 144 от 11.04.2016 г.).

В отечественной практике решения задач обеспечения промышленной и пожарной безопасности уже достаточно длительное время используются различные инструменты анализа рисков, а также их комбинации. Опыт применения различных инструментов анализа рисков нашел свое отражение в международном стандарте ISO 31010 и его Российском аналоге ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 [3], который представляет собой справочник по основным инструментам исследования рисков.

При этом существенной проблемой, остается недостаточно четкое описание некоторых инструментов (методов) исследования рисков, наличие неоднозначных трактовок некоторых положений стандартов, вызванных отсутствием необходимых разъяснений, а также заимствованием данных из международных стандартов и низким качеством перевода последних.

Кроме того, большинство нормативных и методических документов содержат описания большого числа разнородных методов исследования рисков, но не дают рекомендации по обоснованному выбору и применению взаимодополняющих друг друга методов, направленных на комплексное снижение риска.

В последнее время растет понимание того, что для получения синергетического эффекта от применения риск-ориентированных подходов требуется систематическое, согласованное и корректное применение в необходимый момент различных инструментов (методов) исследования риска. Однако, существующая нормативная и методическая база не дает рекомендаций по совместному использованию различных инструментов исследования риска, позволяющих извлечь максимальную пользу от применения

каждого из инструментов и решить задачу снижения зоны неопределенности, а, следовательно, общего снижения экологических, технологических и пожарных рисков ПТК.

Так, например, серия стандартов ГОСТ Р 31000 [2, 3], которая является ядром создания системы менеджмента риска организации, содержит описание ключевых понятий, методологии и базового инструментария исследования риска, однако, в указанных стандартах отсутствуют алгоритмы, выбора совокупности методов, совместное применение которых наиболее пригодно для конкретной ситуации.

Анализ источников показывает, что сведения о возможности интеграции, совместного или комбинированного использования различных инструментов исследования рисков не структурированы, фрагментарны и «рассыпаны» по различным стандартам.

Например, в разделе 5.2 «Связь с другими методами анализа» ГОСТ Р 51901.11-2005 [4] о комбинации различных методов анализа риска говорится следующее: «Такие комбинации используются, когда исследование HAZOP ясно указывает, что эффективность конкретной единицы оборудования является критической, и она должна быть исследована более глубоко. В этом случае HAZOP может быть дополнен FMEA этой единицы оборудования. ... HAZOP является подходом, ориентированным на систему в целом, в противоположность FMEA, который ориентирован на компоненты системы».

Из приведенного описания следует, что если какой-либо элемент системы признан «критическим» с точки зрения обеспечения безопасного функционирования исследуемой системы, то для такого элемента следует провести углубленное исследование риска. Однако, цели, задачи и методы исследования здесь не указаны. Приведенная ссылка говорит только о возможности использования метода FMEA, но не дает понимания о том, насколько эффективен будет именно этот метод для углубленного исследования риска.

2. Основные виды причин возникновения рисков и инструменты для их анализа

Из практики менеджмента риска известно, что риски имеют вероятностную природу и обусловлены влиянием внешних и внутренних причин. На рис. 1 схематично показаны основные источники рисков экологических, технологических и пожарных рисков ПТК.

К числу внешних причин, относятся внешние по отношению к исследуемому объекту факторы, которые не свойственны этому объекту, соответствующим действиям или операциям процесса, а обусловлены воздействием внешних факторов (например, погодные условия, воздействия от соседних объектов и т.п.) или факторами внутренней среды организации, (например, такими как корпоративная культура, компетентность и квалификация персонала, инфраструктура и т.д.).

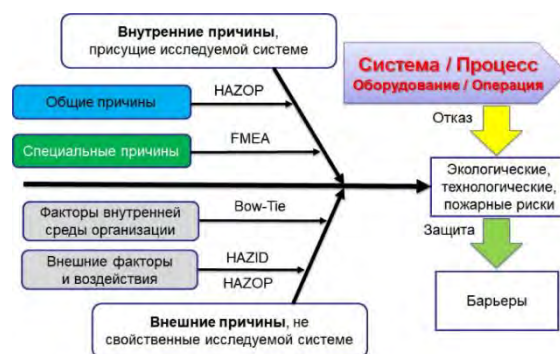


Рис. 1. Источники рисков ПТК

Важно понимать, что при исследовании экологических, технологических и пожарных рисков ПТК фокус внимания обращается, в первую очередь, на выявление внутренних причин возникновения риска, которые связаны с внутренними особенностями применяемого оборудования, спецификой технологического процесса и его составляющих (операции, действия).

Внутренние причины возникновения рисков, в свою очередь, являются следствием действия общих и специальных причин. Здесь под общей причиной понимается влияние на процессы (операции и действия) случайных факторов и событий, таких как отказы оборудования и ошибки персонала, обусловленные вероятностной природой протекающих процессов. Под специальной причиной понимается влияние конструктивных и технологических причин, которые создают условия для возникновения отказов оборудования и нарушения технологического процесса.

Специальные причины операционных отказов могут быть обусловлены следующими факторами:

- недоработанная конструкция/технология (неправильно выбраны параметры конструкции или технологического режима, неточность или неоднозначность описания действий персонала, некорректные требования к средствам измерения и т.п.). В некоторых источниках они называются «устраняемые причины» [7];

- естественные механизмы, иногда называемые неустраняемыми причинами [7] (например, естественный износ оборудования, коррозия, утомляемость персонала), которые не были выявлены на этапе проектирования конструкции или технологии и, соответственно, не взяты под управление;

- отклонение, так называемых, М-факторов от требований технологического процесса: оборудование (Machine), сырье (Material), персонал (Man), технология (Method).

3. Алгоритм интеграции инструментов исследования рисков промышленной безопасности

Анализ применимости и практического опыта использования инструментов исследования рисков для исследования различных видов причин возникновения рисков показывает, что некоторые из инструментов могут служить основой для реализации интегрированного подхода к исследованию рисков в области исследования

экологических, технологических и пожарных рисков ПТК.

На рис. 1 показаны инструменты, применение которых наиболее эффективно для анализа соответствующих видов причин возникновения рисков:

1) Исследование опасности и работоспособности (HAZOP) [3, 4] – анализ внешних факторов и воздействий, анализ общих причин.

2) Анализ видов и последствий отказов (FMEA) [5, 6, 8] – анализ специальных причин.

3) Анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie) [3, 9] – анализ факторов внутренней среды организации.

4) Предварительный анализ опасностей (РНА или HAZID) [3] – анализ факторов и воздействий, обусловленных внешними, по отношению к ПТК и протекающим на объекте технологическим процессам, соответствующим его назначению, причинами.

5) Анализ первопричины (RCA) [3] – анализ потерь вследствие различных видов отказов (все виды причин).

Интересно отметить, что диаграмма «причина – результат», представленная на рис. 1, также входит в перечень методов анализа риска [3].

Анализ возможностей вышеперечисленных инструментов исследования рисков позволяет утверждать, что для исследования внутренних причин возникновения рисков наиболее применимы метод анализа опасностей и работоспособности (HAZOP) [4, 9], который позволяет проводить анализ общих причин возникновения риска, а также метод FMEA и его модификации [3, 6, 8], которые наилучшим образом подходят для анализа специальных причин возникновения риска.

Однако, для полноценного решения задачи исследования рисков ПТК использования только двух указанных инструментов, недостаточно. Это связано с тем, что оба метода ориентированы, в первую очередь, на поиск причин, но не в полной мере позволяют анализировать последствия, возникающие при реализации указанных причин. В то время, как при исследовании экологических, технологических и пожарных рисков, разработке мероприятий, направленных на снижение указанных рисков, требуется учитывать и сравнивать последствия, которые могут возникнуть при реализации различных причин и их совокупности.

В этой связи актуальным становится применение дополнительного метода анализа риска RCA [3], который используют для исследования потерь вследствие различных видов отказов. Целью применения метода RCA является выявление первичных причин отказа и оценка потерь, обусловленных этим отказом, с целью выявления возможностей постоянного улучшения мер защиты.

В соответствии с [3] метод RCA может быть применен не только для анализа последствий, но и для определения вероятностных характеристик опасного события, уровня риска, а также для сравнительной оценки рисков.

Таким образом, полное решение задачи исследования внутренних рисков промышленной безопасности (см. рисунок 1) может достигнуто за счет реализации интегрированного подхода, основанного на согласованном использовании методов HAZOP, FMEA и RCA.

На рисунке 2 приведен алгоритм, интегрированного применения вышеуказанных инструментов исследования рисков, который позволяет получить синергетический эффект исследования рисков ПТК.

Для исследования внешних причин проявления рисков, обусловленных внешними факторами и воздействиями на элементы и инфраструктуру ПТК, в качестве наиболее эффективных инструментов выступают:

– метод HAZID – в случае анализа общих факторов риска, связанных с окружением, внешней средой, воздействием соседних объектов и т.п.;

– метод HAZOP – в тех случаях, когда рассматриваются внешние факторы, напрямую влияющие на технологический процесс или оборудование ПТК.

Для анализа факторов внутренней среды организации можно использовать простой и удобный инструмент исследования риска Bow-Tie [3, 9]. Важной особенностью этого инструмента является то, что он соединяет в единую причинно-следственную цепочку опасность, опасное событие, причины возникновения опасного события, меры его предупреждения, меры локализации и потенциальные последствия опасного события.

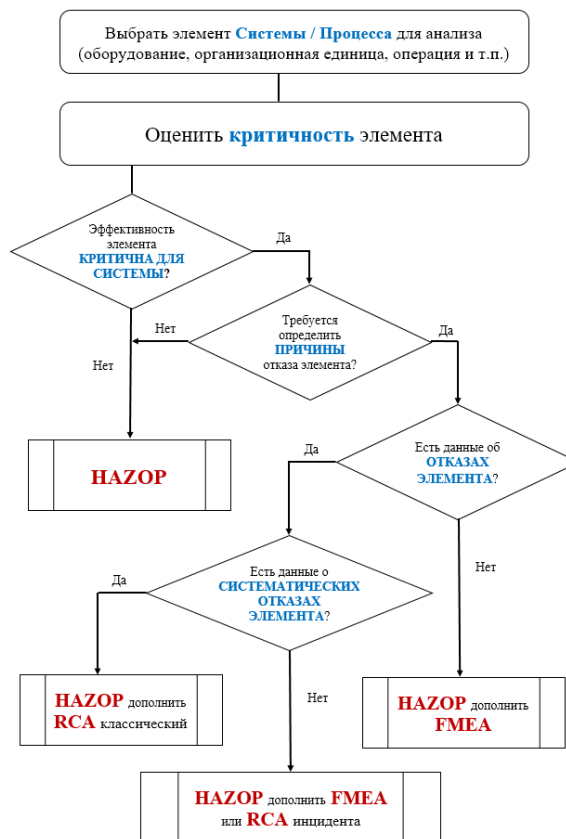


Рис. 2 – Алгоритм интеграции инструментов исследования рисков, обусловленных влиянием внутренних причин

Используя диаграмму Bow-Tie можно наглядно представлять результаты исследования риска (см. пример применения инструмента в [9], а также контролировать наличие, состояние и результативность барьеров безопасности (меры предупреждения и локализации опасного события).

Соответственно, на базе интеграции различных методов, например, HAZID и Bow-Tie, HAZOP и Bow-Tie, Bow-Tie и FMEA также можно получить существенный синергетический эффект.

В первом случае, при интеграции HAZID и Bow-Tie, обеспечивается высокая наглядность результатов исследования рисков, а также возможность формирования требований по проектированию, созданию и поддержанию надежности барьеров безопасности.

Во-втором случае, при интеграции HAZOP и Bow-Tie, также обеспечивается высокая наглядность результатов исследования рисков, а, кроме того, создаются условия для мониторинга выполнения проектных требований на создание барьеров безопасности (в первую очередь здесь идет речь о барьерах предупреждающего типа) и для контроля состояния барьеров безопасности.

Третий случай, при интеграции Bow-Tie и FMEA, может рассматриваться как дальнейшее углубленное развитие интеграции первого и второго типа или как вариант самостоятельного использования результатов исследования рисков, полученных с использованием метода Bow-Tie. В третьем случае, создаются условия для глубокого и систематического исследования каждого барьера защиты, зафиксированного на диаграмме Bow-Tie, с использованием метода FMEA. Целью такого исследования является выявление наиболее критичных с точки зрения обеспечения экологической, промышленной и пожарной безопасности ПТК функций барьеров безопасности. Здесь FMEA используется для идентификации возможных способов отказа компонентов, систем или процессов, которые могут привести к невыполнению барьером безопасности своей основной функции.

Использование метода FMEA в дополнение методу Bow-Tie позволяет расширить и углубить семантическое описание риска: «Опасность – Операция (процесс) – Вид потенциального отказа – Последствие отказа (опасное событие) – Причина – Барьеры по предотвращению (для каждой причины) – Барьеры по обнаружению (для каждой причины) – Барьеры локализации – Риск», дополнив его данными о возможных отказах барьеров безопасности.

При этом, в процессе создания детализированного описания, для каждой функции безопасности анализируются конструктивные особенности барьера, используемые технологии, причины возникновения изменчивости, влияющие на достижение ожидаемых результатов каждой операции. В результате такого анализа формируются семантические цепочки следующего вида: «Функция безопасности (операция, процесс) → Установленная характеристика функции (Требование) → Отклонение фактической характеристики от требований → Отказ операции (частичное или полное невыполнение функции на уровне требований) → Опасность (способность нанести ущерб, негативные последствия)».

По итогам проведенного анализа оцениваются результативность и качество процессов, определяются контрольные признаки или несоответствия, которые приводят к ухудшению качества или создают возможность возникновения опасного события и негативных последствий.

На современном этапе развития техносферы в РФ задача интеграции различных инструментов исследования рисков является актуальной и необходима для получения практического эффекта от различного рода разрозненных и несвязанных единой целью исследований экологических, технологических и пожарных рисков.

Полный объем сведений об ПТК, необходимый для адекватного понимания его состояния, протекающих в нем процессов и принятия наиболее рациональных и безопасных решений по управлению функционированием ПТК, включает в себя три составляющих:

- априорная информация – информация в форме знаний о ПТК, выраженная в проектной и рабочей документации, баз данных и знаний, различных видов моделей, алгоритмов оценки состояния и принятия решений и т.п.;

- текущая информация – объективная информация о фактическом состоянии ПТК, ее составных частей и элементов, окружающей его среды, в конкретный момент времени;

- прогностическая информация – информация о возможных путях развития процессов и состояния элементов, связанных с существованием и функционированием ПТК.

Априорная информация включает в себя, в том числе, и данные о всех идентифицированных внешних и внутренних рисках, возникновение которых обусловлено свойствами конкретной ОТС, а также влиянием внешней и внутренней среды. Такие риски анализируются, классифицируются и документируются на ранних стадиях жизненного цикла ОТС (создание), а затем уточняются и дополняются в процессе эксплуатации системы.

Источником для формирования априорной информации могут служить, в том числе такие методы анализа рисков как «Исследование опасности и работоспособности» (HAZOP), «Анализ видов и последствий отказов» (FMEA), «Предварительный анализ опасностей» (HAZID), «Анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie) и «Анализ первопричины» (RCA), а также другие исследовательские и расчетные методы исследования рисков.

Общим недостатком всех этих методов является то, что они, по своей сути, являются экспертными методами, результат которых обеспечивается знаниями и опытом экспертной группы, выполняющей исследование риска. Данные методы не позволяют выполнять оперативную переоценку риска при изменении внешних и внутренних условий и, соответственно, априорная информация, может быть неполной, не учитывать все возможные состояния и условия функционирования всех элементов ПТК, что создает дополнительные риски при эксплуатации ПТК.

Текущая информация является результатом процедур сбора и анализа первичной информации о состоянии различных элементов ПТК, внутренней и внешней среды, а также процедур оценки и принятия решений о состоянии ПТК.

При оценке состояния различных подсистем ПТК (техника, человек, инфраструктура) используются различные методы и технологии, которые в целом, можно разделить на два больших класса: органолептические (субъективные) и приборные

(объективные) методы. Очевидно, что для первого класса методов наибольшее влияние оказывают риски, обусловленные влиянием человеческого фактора на оценку обстановки и принятие решений. А для второго класса, риски, обусловленные влиянием ошибок первого и второго рода, ошибок средств измерений и передачи данных, а также отказами технических (приборных) средств измерений и элементов технической структуры.

Заключение

Для минимизации рисков, связанных с получением неадекватной, нерелевантной или непертинентной информации на стадиях создания ПТК и, периодически в процессе эксплуатации ПТК, могут использоваться такие методы исследования рисков, как «Анализ видов и последствий отказов» (FMEA), «Деревья событий и отказов» (ETA и FTA), «Анализ «Галстук-Бабочка» (Bow-Tie), «Причинно-следственный анализ» (RCA), различные методы теории надежности, а также инструментальные и алгоритмические методы диагностирования и выявления отказов.

Систематическое применение различных инструментов исследования рисков, интегрированных для достижения единой цели исследования риска, позволяет построить систему эффективного менеджмента риска промышленной безопасности и, на ее основе, организовать непрерывный контроль качества процессов обеспечения экологической, промышленной и пожарной безопасности ПТК.

Интегрированный подход к применению инструментов исследования риска промышленной безопасности в перспективе позволит:

– автоматизировать процессы контроля рисков в области экологической, промышленной и пожарной безопасности безопасности и охраны труда;

– разрабатывать и внедрять в составе различных автоматизированных систем управления ПТК системы поддержки принятия решений, основанные на результатах исследований операционных рисков и операционных отказов.

Литература

1. ГОСТ Р 55507-2013 Эксплуатация речных портов. Термины и определения.
2. ГОСТ Р ИСО 31000-2010 Менеджмент риска. Принципы и руководство.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска.
4. ГОСТ Р 51901.11-2005. Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство.
5. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
6. ГОСТ Р 51814.2-2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов.
7. Кочетков Е.П., Методология предупреждения отказов //Техника железных дорог. №3 (11), 2010.
8. Латынцева С. В., Степанов И. В., Синельников Г. А. Методика анализа операционных рисков технологических процессов с использованием метода анализа видов и последствий отказов (FMEA): Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (1-4 апреля 2019 г.). –М.: ФГБУ «РАРАН», 2019. Т. 2. С. 384-394.
9. Скороходов Д. А., Степанов И. В., Турусов С. Н., Никитин Н. В. Применение инструментов анализа рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решений //Морские интеллектуальные технологии. № 3 (45) т. 3, 2019. С. 114-120.

References

11. GOST R 55507-2013 Ekspluataciya rechnyh portov. Terminy i opredeleniya.
12. GOST R ISO 31000-2010 Menedzhment riska. Principy i rukovodstvo.
13. GOST R ISO/MEK 31010-2011. Menedzhment riska. Metody ocenki riska.
14. GOST R 51901.11-2005. Menedzhment riska. Issledovanie opasnosti i rabotosposobnosti. Prikladnoe rukovodstvo.
15. GOST R 51901.12-2007. Menedzhment riska. Metod analiza vidov i posledstvij otkazov.
16. GOST R 51814.2-2001 Sistemy kachestva v avtomobilestroenii. Metod analiza vidov i posledstvij potencial'nyh defektov.
17. Kochetkov E.P., Metodologiya preduprezhdeniya otkazov //Tekhnika zheleznyh dorog. №3 (11), 2010.
18. Latynceva S. V., Stepanov I. V., Sinel'nikov G. A. Metodika analiza operacionnyh riskov tekhnologicheskikh processov s ispol'zovaniem metoda analiza vidov i posledstvij otkazov (FMEA): Trudy XXII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii RARAN «Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti» (1-4 aprelya 2019 g.). –M.: FGBU «RARAN», 2019. T. 2. S. 384-394.
19. Skorohodov D. A., Stepanov I. V., Turusov S. N., Nikitin N. V. Primenenie instrumentov analiza riskov pri sozdanii reshayushchih pravil sistem podderzhki prinyatiya reshenij //Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 3 (45) t. 3, 2019. S. 114-120.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры Корабельных систем управления, Санкт-Петербургский государственный

Dmitriy A. Skorohodov, professor, Dr.Sci. (Eng), Chief Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-

электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5, e-mail: skorohodda@mail.ru

Илья Владимирович Степанов, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела информационных технологий и разработки СМИС, ООО «Научно-технический центр «Технологии и безопасности», 197198, Санкт-Петербург, ул. Зверинская 22, лит. А, e-mail: ilstep@mail.ru

Сергей Николаевич Турусов, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Акционерное общество «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения» (ВНИТИ ЭМ), 196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 2, e-mail: serniktur@yandex.ru

Владимир Владимирович Ященко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Менеджмента и систем качества, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5, e-mail: Berater51@list.ru

Хабаров Сергей Петрович, Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5. тел. +7(905) 256-66-57 e-mail: serg.habarov@mail.ru

Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: skorohodda@mail.ru

Ilya V. Stepanov, senior lecturer, PhD (Eng) Head of Information Technologies department and SMIS Development LLC "Scientific and Technical Center" Technology and Security ", lit. A, Zverinskaya str., Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation, e-mail: ilstep@mail.ru

Sergey N. Turusov, professor, Dr.Sci. (Eng), General Director, JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM) 2, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation, e-mail: serniktur@yandex.ru

Vladimir V. Yashchenko, senior lecturer, PhD (Eng), assistant professor of Managements and Quality Systems Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: Berater51@list.ru

Sergei P. Khabarov, PhD (Eng), associate professor of the Department of Information Systems and Technologies St. Petersburg State Forest Technical University, Institutskii lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation Tel. +7(905) 256-66-57 e-mail: serg.habarov@mail.ru

УДК 681.3.06, 519.8, 004.627, 932.2

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.020

Когнитивные транспортные видеосистемыШ.С. Фахми^{1,2}, И.Г. Малыгин^{1,3}, С.М. Егоршев⁴, Ю.Е. Крылов¹

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, ⁴Департамент программ развития Министерства транспорта Российской Федерации

Аннотация. Цель развития систем искусственного интеллекта заключается в создании человекоподобного робота со способностями мыслить и принимать решения. Исследования в области компьютерного зрения начались в 1960-х годах. Ограничения в вычислительных ресурсах, отсутствие элементной базы с программируемой логикой и высокая стоимость проектов, выраженная в единицах числа вентилей, не позволяли, на первых этапах, использовать искусственный интеллект при решении задач обработки видеoinформации с наличием шума и помех. В последние десятилетия развитие методов машинного обучения способствовало заметному прогрессу в создании систем технического зрения на основе технологии «система на кристалле». Однако, большинство прикладных программ опираются на чисто восходящие методы проектирования (снизу вверх), не поддающиеся обобщению и требующие большие объемы данных. В данной работе проведен анализ знаний, основанных на результатах тестирования новых методов и технологий, связанных с системами компьютерного зрения за последние десять лет. Показано, что для создания когнитивных систем необходимо использование явных знаний, способствующих улучшению эффективности систем распознавания образов. Интеграция точных знаний с видеoinформацией позволяет получить современные приложения для обучения с использованием визуальных данных, с применением методов «снизу вверх» и «сверху вниз» (аналогичного механизму человеческого зрения). Рассмотрены важные этапы построения когнитивных видеосистем, включающие: сегментацию изображений, алгоритмы нахождения и структуризации характерных точек, принцип доминанты и выделение контуров объектов изображений.

Ключевые слова: когнитивные системы, распознавание, обнаружение, видеосистемы, базы знаний, обучение на основе знаний.

Cognitive transport video systemsShakeeb S. Fahmi^{1,2}, Igor G. Malygin^{1,3}, Sergey M. Egorshv⁴, Yuriy E. Krylov¹

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, ²St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", ³St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, ⁴Department of Development Programs of the Ministry of Transport of the Russian Federation

Abstract. The goal for developing artificial intelligence systems is to create a humanoid robot with the ability to think and make decisions. Research in computer vision has started in 1960s. Limitations in computing resources, the lack of an element base with programmable logic and the high cost of projects, expressed in units of the number of gates, did not allow, at the first stages, using artificial intelligence when solving problems of processing video information with the presence of noise and interference. In recent decades, the development of machine learning methods has contributed to significant progress in the creation of vision systems based on the system-on-chip technology. However, most software applications rely on purely bottom-up design methods (bottom-up) that cannot be generalized and require large amounts of data. This paper analyzes the knowledge based on the results of testing new methods and technologies associated with computer vision systems over the past ten years. It is shown that to create cognitive systems, it is necessary to use explicit knowledge that improves the efficiency of pattern recognition systems. Integration of accurate knowledge with video information allows getting modern applications for training using visual data, using the methods "bottom-up" and "top-down" (similar to the mechanism of human vision). The essential stages of building cognitive video systems are considered, including: image segmentation, algorithms for finding and structuring characteristic points, the principle of dominant and selection of contours of image objects.

Keywords: cognitive systems, recognition, detection, video systems, knowledge bases, knowledge-based learning.

Введение

В Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН) ведутся научные исследования по разработке методов интеллектуализации транспортной сферы [1,2]. В частности, ведутся исследования в области разработки когнитивных и видеoinформационных систем, позволяющих повысить эффективность контроля и управления транспортными сетями с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности человека [3].

Разработки реализованы в автономных интеллектуальных системах восприятия и понимания визуальных данных о внешнем мире. Последние разработки по анализу видеoinформации в области

компьютерного зрения впервые осуществлены на уровне задач искусственного интеллекта (ИИ).

На раннем этапе технологии интеллектуализации в различных промышленных, научных и военных областях разрабатывались для автоматизации процессов управления и не распространялись на обработку и актуализацию визуальных данных компьютерного зрения. Последующие исследования уже были ориентированы на использование математического аппарата ИИ для решения конкретных практических прикладных задач обработки видеoinформации в соответствующих приложениях [4].

Важно отметить сходство технологий ИИ и технологий систем на кристалле (СНК) заключающееся в сочетании и аппаратных, и

программных средств. Это сочетание позволяет пользователю-непрограммисту: с позиции технологий ИИ ставить и решать интеллектуальные задачи с учетом ограничений подмножеств естественного языка, а с позиции технологий СпН синтезировать и размещать всю систему на одном кристалле с учетом ограничений сложности – числа вентиляей.

Первые попытки создания искусственного зрения и моделирования механизма человеческого глаза принадлежали Розенблатту и Мак-Каллоку 1956-1965 гг. Их кибернетическая модель восприятия видеoinформации мозгом (персептрон) стала одной из первых моделей нейросети. Тогда возникла проблема чувствительности к написанию букв при распознавании текста [5].

В последнее время разработка новых методов в таких областях, как машинное обучение, способствовала значительному прогрессу в области компьютерного зрения, позволяя системам выполнять определенные и существенные шаги в реализации когнитивных методов. Следует отметить, что производительность видеосистем в значительной степени зависит от степени адаптации к новым условиям [6].

Главная проблема машинного зрения заключается в создании надежных и гибких систем, которые могут распознавать сложные классы объектов видеoinформации в сложных условиях шума и помех. В этом контексте, модель человеческого зрения является наиболее перспективной в качестве эталонной модели для создания будущих когнитивных систем искусственного зрения (КСИЗ) [7].

В последние годы получили развитие исследования по созданию систем, обладающих возможностями человеческого интеллекта путём объединения предварительных знаний и визуальной информации в когнитивных системах, основанных на визуальных данных познания, что является важным шагом на пути к построению КСИЗ. Эти системы могут выполнять распознавание в условиях ограничений, характеризующихся наличием геометрических вариаций, различных условий освещения, окклюзии объектов изображений и прочее [8]. Они обычно используют контекстуальные знания, полученные сверху вниз из визуального опыта, в сочетании с постоянно собираемой информацией снизу вверх.

Например, в человеческом сознании один и тот же объект будет известен по опыту и накопленному знанию о существующих различных формах или размерах. Такое накопление опыта позволяет КСИЗ понимать и классифицировать новые образы [9]. Поэтому системы машинного зрения, основанные на знаниях, могут интегрироваться в единую среду, работающую снизу вверх при интегрировании знаний, и выполняющие задачи узнавания с помощью предыдущих знаний сверху вниз в процессе формирования вывода и принятия решений [10].

Транспорт имеет основополагающее значение для экономического роста и качества жизни. С появлением вездесущих цифровых IP-камер и современных систем видеоаналитики стало реальным сделать общественный транспорт более безопасным, умным и дешевым. Развитие

Интернета, сети 5G, облачных сервисов ИИ и подобных прикладных технологий обеспечивают возможность решающей интеллектуализации транспорта.

В настоящее время существует множество работ по моделированию нейронных сетей глубокого обучения, обеспечивающего создание когнитивных систем распознавания и классификации видеoinформации. Однако общий недостаток всех разработок заключается в огромных вычислительных затратах, что препятствует созданию систем на кристалле для мобильных и миниатюрных устройств обнаружения и распознавания [8].

В данной статье рассматриваются вопросы развития видеосистемы искусственного зрения, как КСИЗ, для решения задач распознавания и принятия решений на основе накопленных знаний и при изменчивости мешающих условий [7].

1. Видеосистемы в условиях ограничений

Присущая визуальным системам сложность обусловлена природой, как сигналов, так и символов. Изображение объектов представляет собой приближенную запись яркостей сцены в дискретном виде, зависящем от освещения объектов, ракурса и формы на плоскости и в пространстве (Рис.1).

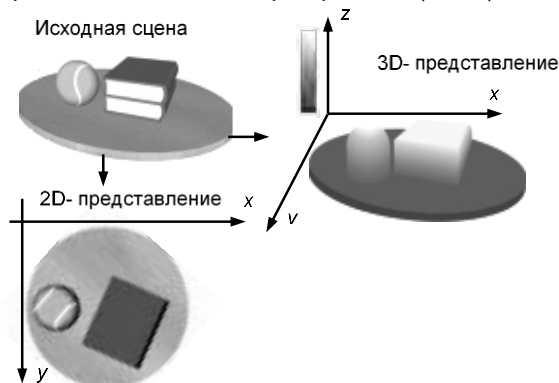


Рис. 1. Реальная сцена и её 2D и 3D представления

Кроме того, сигнал всегда подвергается одним из многих искажений: окклюзии, зеркального отражения, атмосферных условий и т.д., что существенно осложняет разработку эффективной аналитической модели, которая бы учитывала и компенсировала все эти искажения [8,9]. Следовательно, необходимо построить эффективную структурированную модель для компактного представления баз знаний не только о классе объектов на изображениях, но и о взаимосвязях между ними.

Одно из главных направлений создания и интеграции знаний заключается в представлении визуальных данных в виде структурированных описаний характеристик и признаков объектов видеoinформации в процессе отделения их от фона для создания семантической сети, как основы когнитивной видеосистемы. Качественная когнитивная видеосистема – это хорошо структурированные видеоданные [7].

Осмысление видеoinформации для представления конкретного образа заключается в установлении соответствия между изображением (т. е. сигналом) и объектом базы знаний (символом).

Следовательно, недостаточно реконструировать только геометрию сцены, например, описывая ориентации и положения поверхностей.

Семантическая интерпретация должна также включать типы (или классы) объектов, присутствующих в изображаемой сцене, их пространственные отношения друг с другом и со зрителем, их семантические взаимосвязи (такие как части/целые) и, возможно, их функциональные свойства, когда это уместно [8].

Общая цель компьютерного зрения заключается в том, чтобы предоставлять визуальную информацию для данного конкретного прикладного назначения [9]. Другими словами, хотя в последнее время в области компьютерного зрения основное внимание уделяется узко определенным подзадачам прикладного назначения, долгосрочные цели исследований в области компьютерного зрения должны быть амбициозными и представлять собой сенсорную составляющую КСИЗ – «глаза», как одно из бесчисленных множеств реальных приложений интеллектуальных систем. При этом, несмотря на то, что области интересов являются широкими и охватывают различные сферы жизнедеятельности человека, системы компьютерного зрения должны быть способны обеспечивать необходимую семантическую интерпретацию окружающей их среды.

Для достижения этой цели, необходимо, чтобы в состав КСИЗ все входящие компоненты (модули) были сгруппированы по трём основным категориям:

- компоненты визуализации низкого уровня;
- компоненты визуализации промежуточного уровня;
- компоненты визуализации высокого уровня (системного) уровня. (Рис. 2).

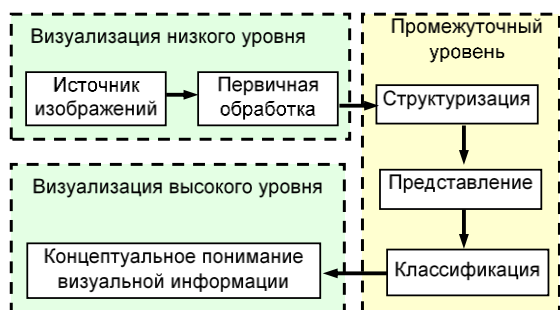


Рис. 2. Структурная схема типичной КСИЗ

Низкоуровневые задачи зрения включают в себя такие операции, как получение и предварительная обработка видеоинформации. Задачи среднего уровня относятся к нахождению характерных точек (ХТ), сегментации, символическому представлению, классификации и распознаванию. Задачи и компоненты видения высокого уровня связаны с достижением концептуального понимания информации, полученной из модулей видения более низкого уровня.

Полная когнитивная система зрения (Рис.1) должна обеспечивать реализацию этих трех уровней решения всех задач, необходимых для идентификации объектов изображений и установления отношений и связей между этими объектами. Система когнитивного зрения – это

функционально-аппаратная реализация комплекса для решения минимума указанных задач.

Пока исследователями не предложена структура функционально-аппаратного комплекса когнитивного зрения, универсального для любой базовой модели.

В настоящее время компьютерное зрение широко используется при реализации приложений промежуточного уровня (Рис. 2), например, в таких задачах, как автоматизация промышленных производственных линий. При этом техническое зрение обеспечивается только на основе математических описаний без использования предшествующих знаний. Следовательно, проблема видения на данном уровне заключается в том, что оно часто не может соответствовать реальным условиям и не способно оценивать различные характеристики и признаки в условиях искажения и деформации объектов.

Таким образом, основная задача данного уровня заключается в разработке КСИЗ, устойчивых к шуму и отклонениям от моделей, основанных на накопленных данных, а также оптимальных с точки зрения требований к вычислительным задачам и объёму памяти. При этом набор обучающих данных должен быть оптимален по объёму и инвариантен к деградации знаний об объекте.

Несмотря на наличие многочисленных графически интерфейсов, с высокой производительностью обработки большого объема визуальных данных, системы компьютерного зрения станут полноценными только с разработкой методов и технологий распознавания образов на основе КСИЗ.

Рассмотрим кратко основные задачи обработки видеоинформации на основе КСИЗ и методы их решения, предлагаемые в Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН:

1) *Обеспечение инвариантности КСИЗ* на основе локальной нормализации областей изображений с помощью линейных устройств нормализации и выпрямления для обучения соответствующих нейронов.

Глубинное (или глубокое) обучение (англ. deep learning) представляет собой набор алгоритмов машинного обучения на высоком уровне абстракции с целью выделения из видеоданных скрытых признаков [3].

Следует отметить, что инвариантность КСИЗ к переносу, масштабированию и к незначительным искажениям обеспечивается тремя механизмами сверточных сетей (Рис. 3):

- *локальное извлечение признаков*. Нейрон получает входные данные от локального рецептивного поля предыдущего слоя, извлекая, при этом, его локальные признаки. Каждый извлеченный признак имеет точное местонахождение (координаты) относительно других признаков;

- *формирование слоев в виде набора карт-признаков*. Каждый вычислительный слой состоит из множества карт-признаков – плоскостей, на которых все нейроны должны использовать одно и то же множество весовых коэффициентов (синаптических весов). Такая форма усложняет структуру нейронной сети, но имеет два важных преимущества: инвариантность к смещению с помощью свертки с ядром небольшого размера, и сокращение числа свободных параметров, за счет совместного

использования коэффициентов нейронами одной и той же карты;

- *подвыборка*. За каждым слоем свертки следует вычислительный слой, осуществляющий локальное

усреднение и подвыборку. За счет этого достигается уменьшение разрешения для карт-признаков.

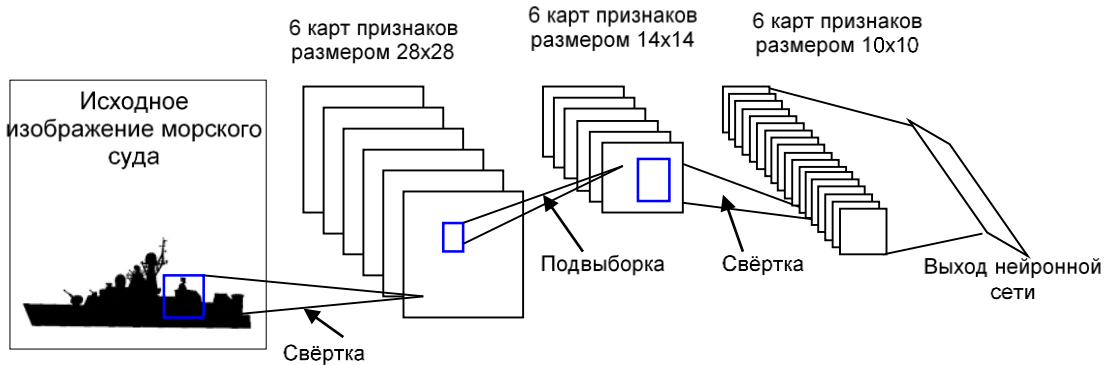


Рис. 3. Структура нейронной сети

Последовательное применение свертки и подвыборки приводит к так называемому повышению уровня признаков: если первый слой извлекает локальные признаки из областей изображения, то последующие слои извлекают общие признаки, которые также называются признаками более высокого порядка.

Такие операции обеспечивают нечувствительность выходного сигнала оператора отображения признаков к незначительному смещению и прочим формам деформации.

На ранних этапах разработки нейронных сетей применялись наиболее распространенные классические функции активации (операторы отображения признаков) $f(x)$, такие как:

- знаковая функция (*signum*),
 $f(x) = \text{sign}(x)$;
- сигмоида (*sigmoid*),
 $f(x) = 1/(1+e^{-x})$;
- гиперболический тангенс (*tanh*),
 $f(x) = (e^{-2x} - 1)/(e^{-2x} + 1)$.

Однако, искусственную нейронную сеть можно рассматривать как имитацию процесса обучения в живых организмах, для более глубокого освоения принципов работы таких сетей необходимо представлять их в виде вычислительных графов.

Такие вычислительные графы позволяют выполнить рекурсивную композицию набора простых функций для обучения более сложным функциям. Важно знать, что вычислительные графы параметризованы, следовательно, задача сводится к обучению параметров графа путём оптимизации функции потерь. Часто на практике, простейшими типами нейронных сетей являются базовые модели машинного обучения, такие как регрессия по методу наименьших квадратов. Лучшие результаты и главные преимущества нейронных сетей проявляется в полной мере при использовании сложных комбинаций базовых функций.

2) *Сокращение количества параметров КСИЗ*. Количество параметров в большинстве задач распознавания образов достигает нескольких десятков миллионов. Предлагаются новые методы, минимизации числа параметров, путём описания исходной сцены минимальным количеством

характерных точек (ХТ) объектов изображений. На Рис. 4 – пример нахождения характерных точек морских судов и связей между ними.

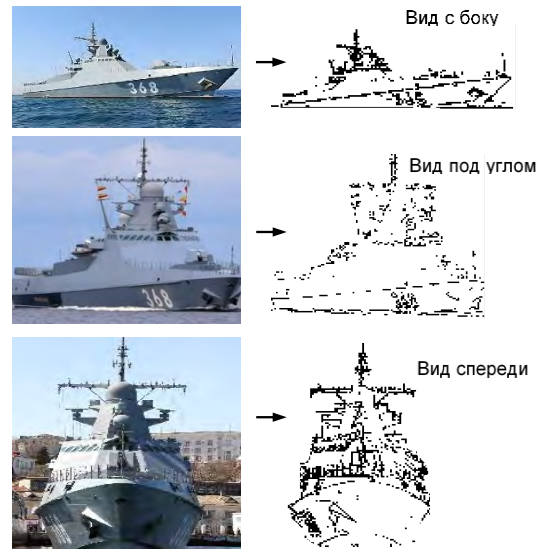


Рис. 4. Нахождение характерных точек морского судна из разных ракурсов

Далее необходимо формировать триангуляционные планарные графы ХТ для создания баз видеоданных (Рис.5).

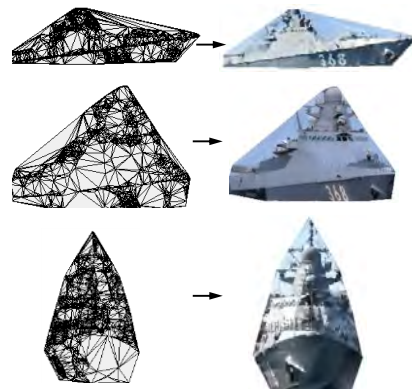


Рис. 5. Триангуляционные решётки морского судна

3) *Обеспечение точности распознавания КСИЗ.* Необходимо обеспечить точную настройку системы распознавания. Распознавание образа морского судна, например, нужно начать с одной из стандартных моделей и её изображения с разных положений и ракурсов, и далее точно настроить систему таким образом, чтобы по ХТ одного варианта можно найти все остальные варианты и формировать базу всех возможных вариантов.

4) *Использование памяти.* Развитие методов распознавания изображений с использованием компьютерного зрения и нейросетевых методов, и появление различных операторов выделения контуров [7,8] привели к появлению первых систем компьютерного зрения.

Применяемые в настоящее время компьютерные видеосистемы не способны обрабатывать данные об объектах и не могут на их основе предсказывать возможные последующие видео. Это снижает их способность обрабатывать видеoinформацию и формировать необходимую цепочку событий.

Таковыми функциями могут обладать только КСИЗ с накапливаемыми базами данных об объектах, разрабатываемые на основе новых технологий и эффективных алгоритмов обработки видео - и других информационно потоков.

2. Системы, основанные на знаниях

Системы, основанные на знаниях, часто используются для выполнения задач с использованием явной формы представления знаний при обработке процессов кодирования и вывода информации с соответствующим механизмом вывода. Таким образом, система знаний состоит из базы знаний и механизма вывода, и формируется в виде определенного приложения.

База знаний – база данных, содержащая информацию о человеческом опыте и знаниях в некоторой предметной области и правила вывода этой информации. А база знаний в области видеоданных – база данных, содержащая структурированные ХТ и правила понимания видеoinформации для формирования точного образа.

Системы базы знаний, основанные на информации, полученной из видеопоследовательностей, требуют в первую очередь эффективного решения следующих задач:

1) разработка параллельных алгоритмов нахождения ХТ объектов изображений;

2) разработка структур данных для оптимального хранения видеoinформации с минимальной длиной описания;

3) применение программируемых схем и субмикронных технологий для формирования сложно-функциональных блоков, составляющих основу КСИЗ;

4) разработка методов и алгоритмов трансформации и преобразования ХТ в условиях изменчивости сцен, и в условиях шума и помех;

5) разработка эффективных архитектур системы, основанной на онтологических и предметно-ориентированных знаниях, для повторного использования и возможности установить формальные свойства требуемых объектов.

Конечной целью систем когнитивного искусственного зрения является реализация общей

интерпретации изображения и семантического описания. Для этой цели были заранее установлены геометрические ограничения при описании объектов изображений (поскольку любой объект может иметь большое количество вариаций) и предложены модели, включающие дополнительную информацию (интерпретация объекта в различных ситуациях) об объектах. Согласно концепции, изложенной психологом Джеймсом Дж. Гибсоном (теория возможностей) [8], образ или понимание объекта ассоциируется у человека с тем, как он используется. Считается, что в раннем детском развитии эта ассоциация инициируется манипуляцией, сначала случайным образом, а затем все более и более утонченным образом [2]. Следовательно, эти модели должны быть основаны на концепции возможностей, поскольку, они могут предоставлять информацию о контексте сцены.

Понимание композиции сцены в изображении (какой набор объектов присутствует) может улучшить качество распознавания сцены, в которую они вставлены. Исследования из других областей когнитивной науки также показали, что визуальное понимание окружающего мира выходит за пределы зрения, и интеграция концептуального знания не может быть упущена из виду.

Концептуальное знание объединяет то, что мы знаем о мире, например, то, что мы узнали из предыдущего опыта. Марвин Мински утверждал, что картинки могут обеспечить глобальную теорию зрения, предполагая, что структуры памяти, называемые буфер-кадрами (или картинками), могут кодировать знания аналогично тому, как люди запоминают информацию, необходимую для идентификации новых ситуаций на основе предыдущего опыта. С помощью структурированных и сжатых способов организации знаний информация может быть пересмотрена и адаптирована к реальной действительности.

Например, наличие множества элементов (в виде ХТ), характеризующих геометрические и амплитудные параметры носовой и кормовой оконечностей корпуса морского судна может помочь распознать изображение морских судов. Эта связь поддерживается в обоих направлениях, так как контекстуальные знания могут также дать представление о функции объекта в сцене, уменьшая воздействие шума датчика или окклюзий.

Определение принадлежности экземпляров к одному из общих классов объектов (их идентификация) является чрезвычайно трудной задачей, отчасти из-за существенных, не поддающихся точному определению различий между экземплярами. Морские судна, например, бывают разных форм и размеров (не говоря уже о цветах и габаритах). Таким образом, распознавание объектов – нечто большее, чем распознавание фиксированных форм, и даже большее, чем строгое совпадение по какой-либо одной характеристике.

Распознавание объектов требует гибкого согласования по различным характеристикам, с возможностью обработки исключений и отклонений. Например, военные и гражданские судна обычно могут быть распознаны на основе ограничений формы (замкнутые объёмы с фиксированными характеристиками носовой и кормовой частей), обычно встречаются подструктуры (например,

ватерлиния, надводный борт, корма) и ограниченный узор хорошо очерченных цветов (как правило, не более двух).

Другие объекты, такие как подводные лодки, представляют собой совершенно другой набор изображений и возможностей вариантов. Поэтому распознавание объектов требует гибкой и многогранной схемы сопоставления. Большинство простых алгоритмов сопоставления просто не адекватны сами по себе, хотя они могут быть частью решения в том, что они могут хорошо работать для определенных объектов или в определенных областях и условиях.

Исследования, проведенные в других областях когнитивной науки [9], также показали, что визуальное понимание окружающего мира выходит за рамки видения, и нельзя упускать из виду интеграцию концептуального знания. Накопленные концептуальные совокупности знаний о мире и о предыдущих опытах необходимы вместе со знаниями, полученными на основе визуальных данных для того, чтобы создавать точные и правильные образы. При этом предварительно требуется решение вопроса о структурировании видеоинформации. Можно утверждать, что объекты изображений, представленные в виде триангуляционных графов, вершинами которых являются ХТ, могут быть базами знаний для развития КСИЗ.

Структуры ХТ объектов и представление их описаний с минимальной длиной позволят кодировать знания так же, как кодируется информация с предсказанием ситуаций на основе предыдущего опыта. С помощью структурированных визуальных данных и знаний, информация может быть пересмотрена и адаптирована к реальности.

3. Базы знаний и искусственное зрение

Помимо использования искусственного интеллекта для интерпретации изображений, были предложены новые алгоритмы, позволяющие интегрировать знания в отдельные компоненты систем технического зрения. В начале системы искусственного зрения, основанные на знаниях, были в основном связаны с задачами видения низкого и среднего (промежуточного) уровня (Рис. 2), такими как сегментация. Кроме того, контекстуальное знание было предложено для сокращения вычислительных ресурсов, поскольку оно создает меньшую нагрузку в системе по сравнению с хранением геометрического представления каждого отдельного варианта одного и того же объекта. Наконец, использование явного представления знаний в системах искусственного зрения дает ряд преимуществ, присущих традиционным приложениям, основанных на знаниях – гибкость и инвариантность без необходимости каких-либо серьезных изменений в существующем коде.

Следует отметить, что когнитивное зрение обеспечивает выход на уровень всех четырех задач компьютерного зрения:

- обнаружение определенного элемента в визуальной сцене;
- локализация и нормализация обнаруженного объекта;
- определение класса принадлежности обнаруженного объекта;

- понимание роли объекта, присутствующего в сцене.

Эти функции реализуются за счет способности:

- познания семантических знаний;
- сохранения контекстуальных знаний и их связи с системой;
- рассуждения об объектах и событиях в окружающей среде.

Следовательно, в контексте данного исследования можно однозначно утверждать, что системы когнитивного видения, основанные на знаниях, наиболее полно обеспечивают решение задач компьютерного зрения.

3.1. Обработка и понимание изображений

Обработка больших объемов обучающих данных на основе классификаторов машинного обучения возможна только с автоматизацией понимания наборов данных видеоизображений.

Например, автоматическое понимание изображений было реализовано на основе получения знаний из видеоданных с помощью схем представления нечетких знаний, основанных на формальном представлении нечеткой сети Петри [5]. Предложенная система использует механизм понимания сцен, связанных с изображениями, полученными из соответствующей области знаний.

Аналогичный подход, использующий связанность объектов, был использован для поиска структурной информации о внутренних связях объектов между собой на изображениях. Эти структурные знания были использованы с применением технологий «помеченный/непомеченный» в модели визуальных данных с помощью контролируемого обучения и тем самым привели к повышению производительности устройств понимания видеоинформации.

В процессе обработки изображений применение знаний вместо необработанных данных было внедрено при обучении передаче для повышения эффективности сегментации текстурных изображений. В то время как это обычно достигается с помощью справочной информации между исходными и целевыми доменами необработанных данных, использование предварительных знаний, извлеченных из других текстурных изображений, оказалось проницательным и менее восприимчивым к шуму, чем другие подходы. Это было достигнуто путем установления попарных связей прототипов кластеризации между исходным и целевым доменами.

Дознания также можно использовать для оформления изображений (соответствующих областей и фрагментов из разных изображений) в обеспечение существенного сокращения вычислительных затрат и с сохранением высокой точности изображений.

3.2. Классификация изображений

Визуальное распознавание, включая проблему обнаружения объектов, широко изучается в области компьютерного зрения на протяжении многих десятилетий. Последние технологии глубокого обучения, основанные на сверточных нейронных сетях, в значительной степени превосходят все когда-либо существовавшие алгоритмы [2].

Например, классификация судов на снимках дистанционного космического зондирования имеет

важное значение для повышения безопасности на море [5]. Однако на внешний вид кораблей легко влияют природные факторы, такие как облака, солнечный свет и т. д., а также широкие вариации внутри класса некоторых типов судов и геометрия обзора, которые делают повышение эффективности классификации судов более сложным и аппаратно не реализуемым [6]. За последнее десятилетие были предложены различные алгоритмы выделения признаков для решения задачи классификации судов с использованием изображений дистанционного зондирования. Например, для классификации судов был использован метод главных компонент (МГК) [4], как один из наиболее популярных инструментов извлечения признаков и уменьшения размерности. Затем в распознавании судов был также использован линейный дискриминантный анализ (ЛДА) [7], что позволило лучше использовать информацию о классе для максимизации межклассовой дисперсии и минимизации внутриклассовой дисперсии по сравнению с МГК. В работах [4,8] для увеличения производительности устройств распознавания морских объектов был применен метод пирамидально-рекурсивного разбиения и формирования неравномерной сетки исходного изображения с дальнейшим использованием МГК, что привело к повышению точности классификации локальных объектов.

3.3. Распознавание объекта

В области распознавания объектов, в лаборатории проблем интеллектуальных технологий ИПТ РАН, ведутся исследования по использованию косвенных и прямых знаний об объектах для повышения производительности традиционных методов поддержки систем векторной конвейерной обработкой данных с более выраженным повышением точности распознавания, особенно в случаях, когда информации о требуемом объекте мало. Контекстуальные знания также используются в качестве действующего контроля для обычного алгоритма статистического обучения (векторного квантования на основе классификатора ближайших соседей в кадре).

Для решения проблем с производительностью, вызванных изменениями освещения, различиями в фоновом режиме, шумом и расхождениями в разрешениях изображений, используются предварительные знания и контекстная информация. Предложена структура для интеграции методов обработки изображений и представления знаний для разработки обобщенной базы знаний, на основе заранее собранных моделей изображений различных объектов (морские суда, транспортные средства, дорожные знаки и т.д.). Такая структура должна автоматически определить реальную ситуацию в процессе обработки видеоинформации.

В этой системе знания приобретались и структурировались для получения и повторного использования формальных событий принятия решений. Визуальная информация, полученная с помощью изображений с камер, и контекстные данные представлены в виде набора структуры знаний опыта, структуры знаний, способной хранить формальные события принятия решений для последующего рассуждения и оценки риска. Затем сгруппированные наборы решений из той же

категории сохраняются в виде набора возможных вариантов для поддержки будущего события принятия решений в аналогичных ситуациях и при тех же входных образах.

Важно отметить, что эти структуры представления знаний эффективны для повышения точности и решения проблем масштабируемости, обеспечивая основу, которая может быть адаптирована к различным условиям, клиентам и ситуациям без необходимости серьезных изменений в программном обеспечении (в коде программы).

Аналогичным образом, для решения проблем, связанных со сценариями реального мира, в которых отсутствует необходимая информация, предложен подход к передаче знаний. Этот подход обеспечивает передачу знаний в КСИЗ по принципу «от тонкого к грубому». Например, при наблюдении за морскими судами со спутниковых систем слежения, где имеется низкое разрешение изображений, но имеются фотографии этих объектов с высоким разрешением.

Несмотря на то, что важность использования доступности была рассмотрена на раннем этапе, вопрос о сборе семантических знаний в качестве доступности остается. Это было устранено с помощью скрытого семантического анализа для преобразования слов в семантические векторы. Исследователи подсчитали частоту появления глаголов и существительных, представляющих собой действие-объект, для запроса поисковой системы изображений и разработали более эффективный способ добычи знаний о доступности, по сравнению с добычей из текстов и изображений [8].

3.4. Распознавание человеческой деятельности

В системах распознавания человеческой деятельности, основанных на знаниях, используются априорные знания о соответствующих действиях (например, знания о том, какие виды деятельности предполагается выполнять, знание формы и размеры объектов и т.д.). А также обеспечивается сбор полной контекстной информации (местоположение, панорама, обзор и т.д.), т.е. информации о среде, в которой синтезируется изображение.

Подходы в формировании априорных знаний и все приложения, на их основе можно сгруппировать в три категории: статистические подходы, синтаксические подходы и подходы, основанные на описании (Рис. 6).

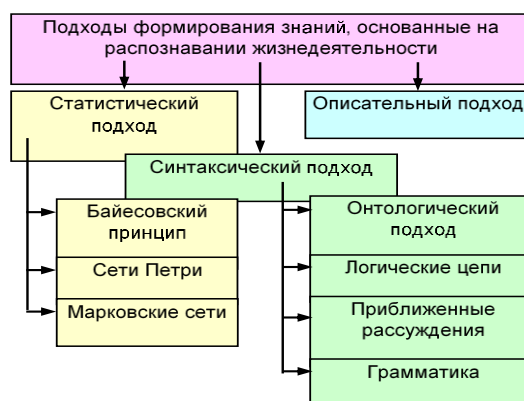


Рис. 6. Подходы глубокого знания в распознавании жизнедеятельности человека

Методы формирования знаний разделяются на следующие группы (Рис. 6):

1) Статистические подходы (в последние годы их использование расширяется), на базе байесовских сетей верований, вероятностных сетей Петри и скрытых Марковских моделей.

2) Синтаксические подходы определяют набор баз домен, связанных с теми сущностями, которые формируют: атрибуты, функции и отношения. Многие разработчики используют этот подход, представляя знания как логические правила (логика первого порядка), приближенное рассуждение (когда представленное знание характеризуется определенной степенью неопределенности, например, экспертные знания, которыми обладают люди), грамматику (теоретические основы моделирования структурированных процессов) и онтологию (формальное описание знания в пределах области).

3) Описательные подходы опираются на пространственно-временные структуры человеческой деятельности. Эти подходы предполагают описание временных структур деятельности с точки зрения последовательных и текущих подэвений [8,9].

Исследования показали, что для выбора эффективных методов классификации объектов изображений необходимо комплексное использование соответствующих знаний.

3.5. Предлагаемый подход классификации судов

Одной из задач настоящей работы является разработка методики классификации объектов изображений для их распознавания, в частности для распознавания обнаруженных морских судов.

Этапы классификации включают следующие основные методы и алгоритмы (Рис. 7):

1) **Сегментация.** Многоуровневая пороговая задача тесно связана с задачей кластеризации, которая сегментирует изображение на несколько классов [5]. Предложенный метод использует кластерное слияние для формирования дендрограммы итеративно до тех пор, пока не будут получены две группы уровней серого цвета. Первоначально предполагается, что каждый серый уровень обозначается, как отдельный кластер. Если в изображении используется K уровней серого, то можно предположить, что существуют K классов, C_1, C_2, \dots, C_K , которые содержат уровень серого T_k в C_k и удовлетворяют условию $T_1 < T_2 < \dots < T_K$. Для удобства, чтобы вычислить параметры и границы кластеров присвоим $T_0=0$.

Сходство (или степень совпадения) измеряется между двумя соседними кластерами на гистограмме, чтобы узнать тесноту между обоими распределениями кластеров. Измерение расстояния $Dist_{AB}$ между кластерами A и B осуществляется с помощью дискриминантного анализа, адаптированного к критериальной функции, определенной известным алгоритмом Оцу. Чем меньше расстояние, тем лучше пара для слияния. Поэтому пара с пороговым значением расстояния между ними может быть объединена. Поскольку пороговый алгоритм может быть обобщен для решения многоуровневой пороговой задачи [3], он

может быть применен и на начальном этапе многоуровневой кластеризации.

Начальные значения для интервала яркостей исходного полутонового изображения $1 \leq k \leq K$ устанавливаются с использованием:

- $P_n = Pr\{C_n\}$ - априорной вероятности n -го класса C .

Заметим, что $\sum_{k=1}^K P_k = 1$;

- $Pr\{z/C_n\}$ - функции плотности вероятности серого уровня z в классе n . Значение интенсивности пикселей z находится в диапазоне $[0, L-1]$, где L - максимальная яркость на исходном изображении, равная 256.

Алгоритм пороговой обработки включает:

1. Для всех K кластеров, каждый из которых состоит из одного серого уровня:

- вычисление среднего значения m_k кластера k , (при инициализации $m_k = T_k$), где T_k - уровни серого, т.е. $T_1 = 0$ - черный пиксель, $T_{255} = 255$ - белый пиксель;

- определение функции плотности вероятности $P_k = h(T_k)$ уровня серого T_k , ($k \in \{1 \div K\}$), где каждый кластер имеет диапазон яркостей серого от 1 до K .

2. Вычисление расстояния между соседними кластерами, $Dist_{k_1 k_2}$, обозначенными k_1 и k_2 следующим образом:

$$Dist_{k_1 k_2} = \frac{P_{k_1} P_{k_2} (m_{k_1} - m_{k_2})^2}{\sigma^2_{k_1 k_2}},$$

где $\sigma^2_{k_1 k_2}$ - общая дисперсия кластеров k_1 и k_2 , если они объединены.

(Если они не объединены, каждый кластер имеет свои интервалы по яркости на гистограмме изображения, следовательно, вычислять кластеры легко и данный алгоритм вообще не нужен).

Вычисление нового среднего значения кластеров k_1 и k_2 (если они объединены) по выражению:

$$M_{k_1 k_2} = \frac{P_{k_1} m_{k_1} + P_{k_2} m_{k_2}}{P_{k_1} + P_{k_2}},$$

где P_{k_1} и P_{k_2} - плотности вероятности кластеров k_1 и k_2 ;

m_{k_1} и m_{k_2} - начальные средние значения кластеров k_1 и k_2 ,

Плотность вероятности P_k в пределах кластера (в интервале от T_{k-1} до T_k) определяется следующим образом:

$$P_k = Pr(C_k) = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} h(z).$$

Средние значения m_{k_1} и m_{k_2} кластеров k_1 и k_2 определяются по выражению:

$$m_k = \frac{\sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} z \cdot Pr(z/C_k)}{P_k} = \frac{1}{P_k} \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} z \cdot h(z),$$

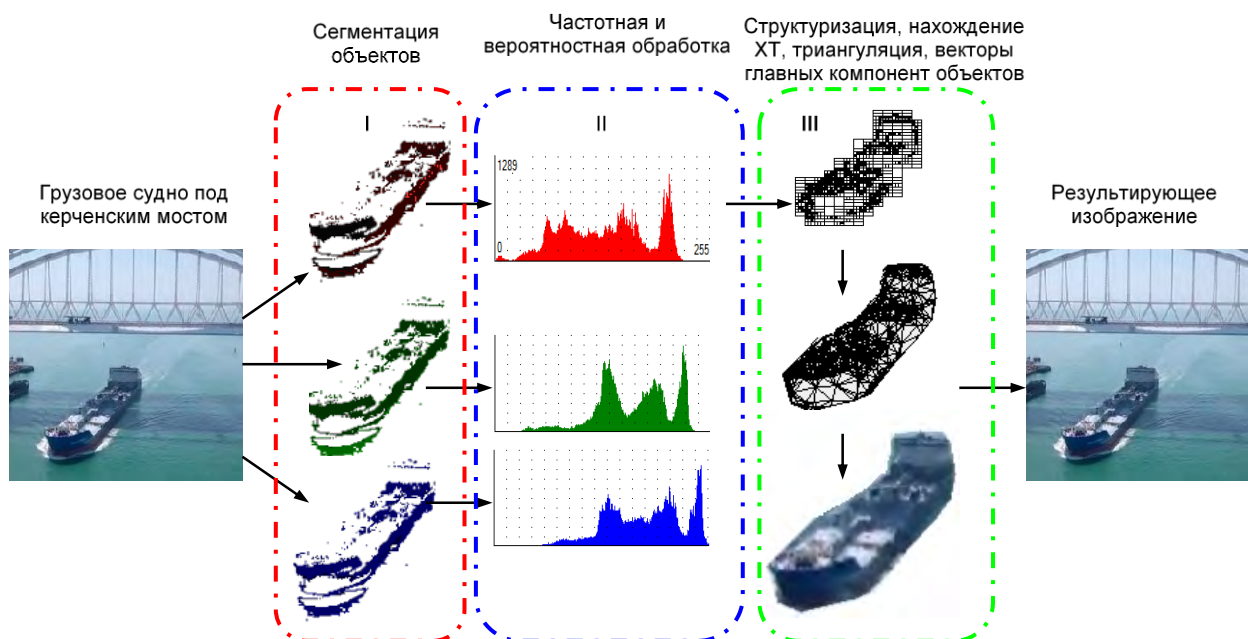


Рис. 7. Этапы и процедуры классификации объектов на изображениях

а дисперсия $\sigma_{k_1 k_2}^2$ двух кластеров k_1 и k_2 :

$$\sigma_{k_1 k_2}^2 = \sum_{z=T_{k_1}+1}^{T_{k_2}} [z - M_{k_1 k_2}]^2 h(z).$$

3. Определение наиболее похожих кластеров k_i и k_j , где $i < j$, с выбором наименьшего вычисленного расстояния между ними и их объединение в один кластер k_i , с присвоением $T_j \leftarrow T_j + 1$ для любого $j > i$.

4. Повторение шагов 2-3 в общей сложности $K-2$ раза.

На заключительном этапе получим два кластера с пороговым значением, обозначаемым T_i .

2) **Принцип доминанты**¹[11]. Исследование и разработка алгоритмов выделения объектов от фона при сохранении максимальной точности по критерию качества доминантой информации (описано в следующем разделе).

3) **Статистический анализ.** Частотная и вероятностная обработки для определения статистических характеристик изображений путём вычисления гистограмм и количественных показателей статистики сигнала изображений.

Исследование и разработка транспортных технологий обнаружения и распознавания на основе программируемых систем на кристалле необходимо провести после определения выше указанных характеристик и свойств сигнала. Они должны обеспечивать решения задач обработки видео, с учетом:

априорной неопределенности статистических свойств сигнала изображений и помех (в силу необозримого разнообразия статистик эта проблема решена лишь для ряда простых наборов априорной информации, и главным достижением теории является выделение двух направлений разработки: устойчивых алгоритмов и адаптивных алгоритмов).

Мера неопределенности. В настоящее время наблюдается рост потребности в анализе видеoinформации в различных областях науки и техники, таких как, транспортная безопасность, дистанционное зондирование, передача и кодирование, техническое (машинное) зрение.

Следовательно, особую актуальность приобретает разработка эффективных методов, способных управлять и обрабатывать большое количество видеоданных. В частности методы, предназначенные для видеоаналитики, индексирования и извлечения видеоданных. Классические методы обработки изображений часто сталкиваются с большими трудностями при работе с изображениями, содержащими шум и помехи. В таких условиях методы с учётом неопределенности (нечеткой логики) оказываются эффективными для решения сложных реальных проблем обработки изображений. В статьях [5,6] исследуются особенности неопределенностей в визуализации путём сегментации скалярных данных с помощью графов, что позволяет понять эту неопределенность.

Для оценки неопределенности сигналов изображений, в частности изображений морских судов, представляется целесообразным воспользоваться методологией статистической радиотехники, в которой используются понятия неопределенности в широком и узком смысле, т.е. различают процессы с постоянной/переменной дисперсией и с постоянной/переменной автокорреляционной функцией. Это подсказывает, что обобщённая мера неопределенности должна учитывать совокупное изменение статистических характеристик S_n сигнала изображения. Это могут быть математические ожидания, мода, медиана, средние значения, дисперсии, радиусы и интервалы (или коэффициенты) корреляции, яркости и цвета и

¹ Александр Константинович Цыцулин – Зам. директора АО «НИИ Телевидение» по научной работе, д. т. н. профессор, автор многочисленных научных трудов по

видеоинформатике, в том числе и принцип доминанты – концептуальная основа проектирования видеoinформационных систем.

др. Каждая из статистик вычисляется для некоторых интервалов: таковые могут быть оценены как отдельные интервалы стационарности или априори компромиссно выбранные интервалы. Данные интервалы должны быть не слишком малыми для получения приемлемых методологических ошибок вычисления статистик и не слишком большими для уменьшения вероятности изменения статистик внутри интервала. Именно такие соображения лежали в основе выбора окна (4×4, 8×8 или 16×16) элементов при разработке стандартов JPEG и MPEG.

Общая мера неопределенности ξ должна вычисляться как сумма (в общем случае взвешенная) мер неопределенностей отдельных статистик: $\xi = \sum \xi_k$.

Для оценки меры неопределенности каждой статистики сигнала изображений предлагается использовать нормированную статистику, вычисляемую аналогично среднеквадратической полосе частот с тем лишь различием, что в формулу должны входить не сами сигналы, а их статистики S_n , вычисляемые раздельно по каждому аргументу. Ниже для упрощения записан один обобщенный дискретный аргумент $k \in [1, K]$. Формула для непрерывных функций непрерывного аргумента включает отношение интегралов от квадрата производной сигнала к интегралу от квадрата самого сигнала. Для дискретных значений статистик можно использовать не производную, а первую конечную разность:

$$\xi = \frac{\sum_{k=1}^K (S_{nk} - S_{n(k-1)})^2}{\sum_{k=1}^K S_{nk}^2};$$

- сложности устройств кодирования;
- нестационарности кодируемых сигналов (эта проблема также как и проблема априорной неопределенности решена лишь для ряда простых наборов нестационарности, и главным достижением теории является выделение класса кусочно-стационарных сигналов и алгоритмов обнаружения интервалов стационарности или сегментации сигналов и изображений).

4) Нахождение и структуризация ХТ.

Разработка алгоритмов нахождения ХТ на основе рекурсивного разбиения на полигоны различной формы и размера.

5) Выделение контуров. Нахождение и представление контуров отдельных объектов, их частичные контуры, полученные в процессе сегментации на основе пирамидально-рекурсивного метода (ПРМ), должны быть аппроксимированы с учётом корреляционных свойств сигнала изображений. Другими словами, необходимо получить контур в результате интерполяции значений яркостей (Рис. 8 а) соседних дискретных пикселей (Рис. 8 б) вдоль границы, формирующей контур объекта.

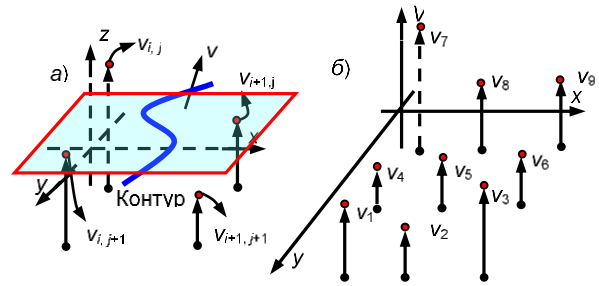


Рис. 8. Интерполяция фрагмента:

Границы и формы контура могут значительно варьироваться, что делает задачу обнаружения и распознавания объектов еще более сложной.

Для определения интерполяционной функции яркости соседних пикселей на изображениях использованы следующие способы:

- интерполяция фрагмента 2×2 (Рис. 8а) при узком размытии границ:

$$V(\bar{x}, \bar{y}) = c_0 + c_1\bar{x} + c_2\bar{y} + c_3\bar{x}\bar{y},$$

где $\bar{x} = \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}; \bar{y} = \frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i};$

c_i – весовые коэффициенты:

$$c_0 = V_{i,j};$$

$$c_1 = V_{i+1,j} - V_{i,j};$$

$$c_2 = V_{i,j+1} - V_{i,j};$$

$$c_3 = V_{i,j} - V_{i+1,j} - V_{i,j+1} - V_{i+1,j+1};$$

V_i – яркость i -го пикселя;

x_i, y_i – геометрические координаты i -го пикселя на изображении;

i, j – относительные координаты в пределах фрагмента.

- интерполяция фрагмента 3×3 (Рис. 8б) при широком размытии границ:

$$V(\bar{x}, \bar{y}) = c_0 + c_1\bar{x} + c_2\bar{y} + c_3\bar{x}\bar{y} + c_4\bar{x}^2 + c_5\bar{y}^2 + c_6(\bar{x}\bar{y})^2 + c_7\bar{x}^2\bar{y} + c_8\bar{x}\bar{y}^2.$$

$$V_1 = V(x_{i-1}, y_{j-1}), \quad c_0 = V_5;$$

$$V_2 = V(x_i, y_{j-1}), \quad c_1 = (V_6 - V_4) / 2;$$

$$V_3 = V(x_{i+1}, y_{j-1}), \quad c_2 = (V_8 - V_2) / 2;$$

$$V_4 = V(x_{i-1}, y_j), \quad c_3 = (V_1 - V_3 - V_7 - V_9) / 2;$$

$$V_5 = V(x_i, y_j), \quad c_4 = (V_6 + V_4) / 2;$$

$$V_6 = V(x_{i+1}, y_j), \quad c_5 = (V_2 + V_8) / 2 - V_5;$$

$$V_7 = V(x_{i-1}, y_{j+1}), \quad c_6 = (V_7 + V_9 - V_1 - V_3) / 4 + (V_8 - V_2) / 2;$$

$$V_8 = V(x_i, y_{j+1}), \quad c_7 = (V_3 - V_1 + V_7 + V_9) / 4 + (V_4 - V_6) / 2;$$

$$V_9 = V(x_{i+1}, y_{j+1}), \quad c_8 = V_5 + (V_3 + V_1 + V_7 + V_9) / 4 - (V_2 - V_4 + V_6 + V_8) / 2.$$

Данный способ вычисления значений яркостей пикселей в локальных областях с учётом корреляции позволяет максимально приблизиться к реальной границе объектов в процессе извлечения признаков и шумоподавления (например, гауссовского шума).

4. Принцип доминантной информации

Известно, что количество информации о полезном сигнале ограничено наличием шума.

Следовательно, при любом преобразовании G кодирующим устройством (КУ) сигнала X , доступного в виде его смеси Y с шумом источника ξ (кодировании, преобразующем его в код Z) количество информации о нем $I(X, Z)$ не может быть больше потенциального значения $I(X, Y)$:

$$I(X, Z) \leq I(X, Y); Z = G\{Y\} \quad (1)$$

Наличие нескольких видов информации (доступной, доминантной, шумовой и фоновой) формализует цель и возможности кодирования источника видеoinформации.

Аналогично неравенству (1) принцип доминантной информации для модели передачи сигнала X в его смеси с фоном F и шумом ξ через канал связи с шумом η (по схеме Рис. 9) описывается системой трех неравенств.

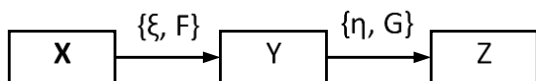


Рис. 9. Кодирование смеси полезной информации с шумом

Система в ходе кодирования включает возможные изменения источника всех трёх количеств взаимной информации в формируемом коде – о доминантной, шумовой и фоновой сигналах:

$$\begin{aligned} I_d(X, Z) &\leq I_d(X, Y) \\ I_\phi(F, Z) &\leq I_\phi(F, Y) \\ I_\psi(\xi, Z) &\leq I_\psi(\xi, Y), \end{aligned}$$

где I_ψ - шумовая информация, I_ϕ - фоновая информация и I_d - доминантная информация.

На начальном этапе применения принципа доминанты при создании КУ было учтено влияние шума на качество информации. При этом фоновая информация из-за коррелированности пикселей видеосигнала практически (но не вся) устранялась благодаря использованию преобразования Карунена–Лозва. На последующем этапе развития КУ уже учитывалось влияние и шума, и фона.

В процессе уменьшения этих двух видов «ложной» информации возникает потеря ΔI доминантной информации:

$$\Delta I = I(X, Y) - I(X, Z).$$

Именно возможность устранения шумовой и фоновой информации согласно схеме (Рис. 9) с выделением доминанты является основой для решения научной проблемы распознавания образов при проектировании КСИЗ.

Профессором А.К. Цыцулиным количественная потеря доминантной информации при невозможности полного устранения КУ фоновой I_ϕ и шумовой I_ψ информации обозначена возникновением информационных рисков.

В работах [5,11] информационные риски R делятся на два типа:

- 1) $R_n = \Delta I + I_\psi$ – риски, связанные с шумом,

- 2) $R_\phi = \Delta I + I_\phi$ – риски, связанные с фоном.

На основе изложенного принципа доминантной информации и количественного определения потерь при наличии шума и фона решается задача количественной оценки качества Q передаваемой через канал связи информации. При этом, в силу закона о существовании нижней границы информационного риска, $R_n \geq 1$ бит/символ, и наличия потери доминантной ΔI информации качество Q передаваемой информации по Шеннону:

$$Q = \frac{I_d}{R_n + R_\phi};$$

выше, чем с использованием преобразования Карунена–Лозва:

$$Q = \frac{I_d}{\Delta I + I_\phi + I_\psi}.$$

Критерий минимума информационного риска, будучи по определению взвешенной суммой потери доминантной информации и ложной (фоновой и шумовой) информации, имеет близкий аналог в виде критерия минимума среднего риска Байеса.

Принцип доминантной информации – концептуальная основа не только радиотехнических систем [4], но и КСИЗ, поскольку объединяет два принципиально важнейших направлений в единую основу: передачи информации и распознавания образов.

Опираясь на принцип доминантной информации, предложена концепция оптимизации КУ и фотоприёмников телекамер, при этом оптимальность осуществляется по критерию максимума качества информации, передаваемой в канале, что не противоречит, а дополняет понятие качества изображения, доставленного получателю.

Заключение

Способность человека использовать зрение в качестве универсального, точного и надежного источника информации для таких разнообразных задач, как распознавание образов, навигация или манипулирование объектами, до сих пор не имеет аналогов и не была достигнута ни одной видео-когнитивной системой.

В данной статье изложены методы создания баз визуальных знаний и способы их реализации и использования, обеспечивающие когнитивность системам искусственного зрения для повышения точности распознавания объектов изображений.

К ним относятся следующие исследования и разработки специалистов ИПТ РАН в области КСИЗ:

- 1) Предложена модель КСИЗ, включающая в себя компоненты (модули): визуализации низкого уровня, промежуточного (среднего) уровня и высокого (системного) уровня, позволяющая создать необходимые базы видеознаний на основе структуризации и классификации 2D и 3D объектов, как на низком, так и на системном уровне.

- 2) В рамках задачи распознавания и классификации объектов изображений разработаны алгоритмы нахождения опорных точек для представления изображений в виде

триангуляционных решёток, обеспечивающих значительное сокращение объема памяти баз знаний. Эти решётки на примере распознавания морских судов и транспортных средств позволили по сравнению с известными алгоритмами распознавания (Principal Component Analysis, Eigenface и fisherface) улучшить точность распознавания до 96%.

3) Исследованы и разработаны параллельные алгоритмы нахождения опорных точек объектов изображений и соответствующие сложно-функциональные блоки для их реализации с использованием программируемых схем, что

позволило заложить основу для создания КСИЗ на базе технологии «система на кристалле».

4) Предложен математический аппарат для решения задач: сегментации, выделения контуров и интерполяции границ объектов изображения.

5) Предложена новая концепция построения КСИЗ на основе объективной оценки качества информации, основанной на выделении доминанты в смеси полезного сигнала с шумом, что позволило объединить два принципиально важнейших направления в единую основу передачи информации и распознавания образов.

Литература

1. Малыгин И.Г., Комашинский В.И. Информационные технологии и искусственный интеллект – основные двигатели четвертой индустриальной революции (Industrie 4.0) // Информационные технологии - №12, Том 22. 2016. С. 899–904.
2. Малыгин И.Г., Комашинский В.И. От военной системы связи к военной когнитивной информационно-телекоммуникационной системе // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 633-638.
3. A. Andreopoulos and J. K. Tsotsos, "50 Years of object recognition: Directions forward," Computer Vision and Image Understanding, vol. 117, pp. 827-891, 2013.
4. Фахми Ш.С., Селиверстов Я.А., Шаталова Н.В., Крюкова М.С., Хасан Я.А., Исмаил А.М.М., Ковалёв К.Е. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1 (45). С. 145-155.
5. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Зубакин И.А., Бобровский А.И., Черногубов А.В. Повышение качества передаваемой видеоинформации при кодировании источника // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 66-71.
6. Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Крюкова М.С., Селиверстов С.А. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 143-155.
7. J. Yun, S.-S. Hong and M.-M. Han, "A Dynamic Neuro Fuzzy Knowledge Based System in Threat Evaluation," in SCIS-ISIS 2012, Kobe, 2012.
8. S. Aditya, Y. Yang, C. Baral, Y. Aloimonos and C. Fermuller, "Image Understanding using vision and reasoning through Scene Description Graph," Computer Vision and Image Understanding, pp. 1-13, 2017.
9. A. Clarke and L. K. Tyler, "Understanding What We See: How We Derive Meaning From Vision," Trends in Cognitive Sciences, vol. 19, no. 11, pp. 677-687, 2015.
10. Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Крюкова М.С., Селиверстов С.А. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1 (41). С. 143-155.
11. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Адамов Д.Ю., Бобровский А.И., Зубакин И.А., Каменев А.А., Морозов А.В., Рогачев В.А., Черногубов А.В. Принцип доминантной информации и его приложение к видеоинформатике // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 4. С. 3-16.

References

1. Malygin I.G., Komashinsky V.I. Information technologies and artificial intelligence-the main engines of the fourth industrial revolution (Industrie 4.0) // Information technologies-No. 12, Volume 22. 2016. pp. 899-904.
2. Malygin I. G., Komashinsky V. I. From the military Communication system to the military cognitive information and telecommunications system// Modern information technologies and it education. 2018. Vol. 14. No. 3. Pp. 633-638.
3. A. Andreopoulos and J. K. Tsotsos, "50 Years of object recognition: Directions forward," Computer Vision and Image Understanding, vol. 117, pp. 827-891, 2013.
4. Fahmi S.S., Seliverstov Y.A., Shatalova N.V. Kryukova, M.S., Hassan Y.A., Ismail A.M., Kovalev K.E. Techniques, coding algorithms and image classification of marine vessels// Marine intelligent technologies. 2019. № 3-1 (45). Pp. 145-155.
5. Tsitsulin A.K., Fahmi S.S., Zubakin I.A., Bobrovsky A.I., Chernogubov A.V. Improving the quality of transmitted video information when encoding a source// Questions of radio electronics. Series: Technique of television. 2018. No. 3. Pp. 66-71.
6. Fahmi S.S., Kostikova E.V., Kryukova M.S., Seliverstov S.A. Video System for detecting sea vessels using triangulation grids// Marine intelligent technologies. 2018. No. 3-1 (41). S. 143-155.
7. J. Yun, S.-S. Hong and M.-M. Han, "A Dynamic Neuro Fuzzy Knowledge Based System in Threat Evaluation," in SCIS-ISIS 2012, Kobe, 2012.
8. S. Aditya, Y. Yang, C. Baral, Y. Aloimonos, and C. Fermuller, "Image Understanding using vision and reasoning through Scene Description Graph," Computer Vision and Image Understanding, pp. 1-13, 2017.
9. A. Clarke and K. L. Tyler, "Understanding What We See: How We Derive Meaning From the Vision," Trends in Cognitive Sciences, vol. 19, no. 11, pp. 677-687, 2015.
10. Fahmi S.S., Kostikova E.V., Kryukova M.S., Seliverstov S.A. Video detection of ships on triangular lattices// Marine intelligent technologies. 2018. No. 3-1 (41). S. 143-155.

11. Tsytulin A.K., Fahmi S.S., Adamov D.Yu., Bobrovsky A.I., Zubakin I.A., Kamenev A.A., Morozov A.V., Rogachev V.A., Chernogubov A.V. The principle of dominant information and its application to video Informatics// Questions of radio electronics. Series: Technique of television. 2018. No. 4. S. 3-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Шакиб Субхиевич Фахми**, доктор технических наук, профессор, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел. +7(812) 234-36-75. E-mail: shakeebf@mail.ru
- Shakeeb S. Fahmi**, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75.
- Игорь Геннадьевич Малыгин**, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., 13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru
- Igor G. Malygin**, professor, Dr. Sci. (Eng), director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru
- Сергей Михайлович Егоршев**, и.о. директора Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации, 109992, Москва, ул.Рождественка, д.1, стр.1. Тел. +7(499) 495-05-90, e-mail: egorshevsm@mintrans.ru
- Sergey M. Egorshv**, acting director of the Department of Development Programs of the Ministry of Transport of the Russian Federation, building 1, 1, Rozhdestvenka str., Moscow, 109012, Russian Federation. Tel. +7(499) 495-05-90, e-mail: egorshevsm@mintrans.ru
- Юрий Евгеньевич Крылов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru
- Yuriy E. Krylov**, Ph.D. (Eng), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.039+519.876

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.021

Адаптивный следящий электрогидравлический привод

Л.А. Краснодарец^{1,2}, С.А. Конева¹, В.М. Цалоев¹¹Севастопольский государственный университет²Институт природно-технических систем

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей снижения влияния параметрических возмущений на показатели назначения корабельного артиллерийского комплекса. Предложен закон адаптивного управления слежением в аналитической форме и способ его технической реализации для снижения чувствительности следящего электрогидравлического привода артиллерийского комплекса к параметрическим возмущениям, возникающим в процессе эксплуатации и приводящих к нежелательным колебаниям объекта управления (вооружения), снижающих показатели его точности. В основе предложенного закона адаптивного лежит локальная оптимизация ошибки слежения (рассогласования) по квадратичному критерию относительно эталонного процесса с заданными свойствами. Структура регулятора, реализующая такой закон адаптивного управления, совпадает со структурой традиционного ПИД регулятора, что прямо указывает на способ его технической реализации. Введение адаптивного регулятора в контур следящего электрогидравлического привода-прототипа снижает его чувствительность к параметрическим возмущениям. При этом первоначальная структура привода существенно не меняется и не требуются дополнительные регулировки. Об этом свидетельствуют результаты компьютерного моделирования, выполненного в среде MATLAB & Simulink.

Ключевые слова: закон управления, объект управления, регулятор, локальная оптимизация, эталонный процесс, синтез, следящий привод, функционал, гидронасос, гидромотор, моделирование, гидроусилитель

Adaptive tracking electro-hydraulic drive

Leonid A. Krasnodubets^{1,2}, Svetlana A. Koneva¹, Vladimir M. Tsaloev¹¹Sevastopol State University²Institute of Natural and Technical Systems

Abstract. The article is devoted to the study of the possibilities of reducing the influence of parametric disturbances on the indicators of the purpose of the ship's artillery complex. A law of adaptive tracking control in analytical form and a method for its technical implementation are proposed to reduce the sensitivity of the tracking electro-hydraulic drive of an artillery complex to parametric disturbances arising during operation and leading to unwanted oscillations of the control object (weapon), which reduce its accuracy. The proposed adaptive law is based on the local optimization of the tracking error (mismatch) by the quadratic criterion relative to the reference process with the given properties. The structure of the controller that implements such a law of adaptive control coincides with the structure of a traditional PID controller, which directly indicates the way of its technical implementation. The introduction of an adaptive controller into the prototype tracking electro-hydraulic drive circuit reduces its sensitivity to parametric disturbances. At the same time, the initial structure of the drive does not change significantly and additional adjustments are not required. This is evidenced by the results of computer simulations performed in MATLAB & Simulink.

Keywords: control law, control volume object, controller, local optimization, reference process, synthesis, tracking drive, functional, hydraulic pump, hydraulic motor, simulation, power steering

Введение

Огромное количество вооружения различного назначения, доставшееся в наследство от СССР, стареет на складах военной техники морально и физически. Скорость этого старения неодинаковая. В первую очередь морально устаревают изделия электронной техники из-за быстрого обновления технологии производства и замены элементной базы. Менее подвержены старению механические изделия. Это приводит к тому, что корабельные автоматизированные артиллерийские комплексы, состоящие, как правило, из объекта управления — собственно вооружения и системы автоматического управления, быстро устаревают и теряют не только привлекательность на мировом рынке, но и боевую эффективность по отношению к современным разработкам как отечественных, так и зарубежных производителей. Яркий пример — корабельная артиллерийская установка (автоматизированный комплекс) на базе типового артиллерийского орудия (объекта управления). Эта установка работает под управлением следящего электрогидравлического

привода Д-213 (СЭПП), разработанного ЦНИИ-173. Недостатком такого СЭПП так же, как и других аналогов (Д-122, Д-219-50), является значительная ошибка углового положения блока стволов (объекта управления) по отношению к задатчику угла, уменьшение величины которой ограничивается колебательностью привода и вследствие этого малым коэффициентом усиления системы по углу. В работе [1] и более поздней [2] приведены описания способов повышения динамических и точностных характеристик объекта управления и ее модификаций. Все они направлены на стабилизацию контура управления, содержащего в своем составе звенья с малым коэффициентом демпфирования $\zeta < 0,2$ (силовая часть привода, состоящая из реверсивного гидронасоса объемного регулирования и гидромотора) за счет введения дополнительных динамических обратных связей по давлению (точнее по его производной). Это приводит к необходимости подключения ко входам гидромотора дополнительных индуктивных датчиков давления и специальных упругокомпенсирующих устройств, что, естественно, ухудшает показатели

надежности системы в целом. При этом следует отметить, что, как показали экспериментальные исследования, коэффициент демпфирования исполнительного гидропривода существенно меняется от эксперимента к эксперименту, а также в зависимости от режима его работы. В [3] показано, что в исполнительных гидравлических приводах (вследствие нелинейности характеристик) с уменьшением амплитуды перемещения золотника колебательность гидропривода возрастает и коэффициент демпфирования может достигать значений $\zeta = 0,05$. В то же время при малых амплитудах управляющих сигналов стабилизирующая дополнительная обратная связь будет малоэффективной. Последнее обстоятельство свидетельствует о сильном влиянии изменения параметра ζ , а, возможно, и других параметров привода (параметрических возмущений, возникающих в процессе его функционирования) на динамические свойства (колебательность и запас устойчивости), приводящем к значительным ошибкам слежения вооружения за целью, и, как следствие, к снижению эффективности стрельбы.

Таким образом, экспериментальное исследование процессов в СЭГП и разработка на этой основе математических моделей и их идентификация для обеспечения возможности поиска новых методов и способов повышения динамических и точностных характеристик объекта управления за счет снижения чувствительности ее системы управления к параметрическим возмущениям является задачей актуальной

Целью работы является разработка и исследование адаптивного закона управления и соответствующего адаптивного регулятора для

следящего объемного электрогидравлического привода Д-213, обеспечивающих снижение его чувствительности к параметрическим возмущениям, требующих регулярных настроек артиллерийского комплекса, как перед началом, так и в процессе эксплуатации.

1. Математическая модель СЭГП

Ниже приводится математическое описание СЭГП Д-213 для горизонтального канала объекта управления в виде структурной схемы, полученное в результате идентификации в ходе экспериментальных исследований режимов функционирования артиллерийского комплекса в натуральных условиях.

На рис. 1 изображена структурная схема СЭГП в форме S-модели для системы визуального моделирования Simulink. В эту модель входят передаточные функции звеньев, образующих структуру следящего привода. При этом вид типовых для СЭГП звеньев (электронного усилителя, тахогенератора, электрогидравлического усилителя, силового гидропривода в составе гидронасоса и гидромотора, редуктора, вращающегося трансформатора) соответствует приведенным в литературе [3] и др.

Параметры передаточных функций модели силовой части СЭГП, расположенной на рис. 1 между точками (а) и (в), постоянные времени, коэффициенты усиления, коэффициент затухания, отражающие массогабаритные, силомоментные и магнитоэлектрические характеристики звеньев, найдены методами идентификации. Остальные параметры найдены по справочным данным на соответствующие изделия.

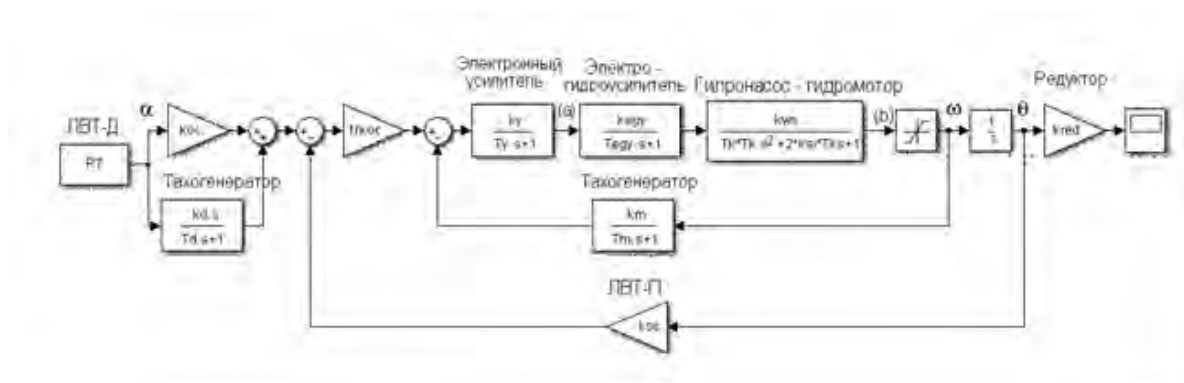


Рис. 1. Модель СЭГП в виде структурной схемы

Как следует из рис. 1, СЭГП представляет собой замкнутую двухконтурную систему, внутренний контур которой образован стабилизирующей гибкой отрицательной обратной связью, которая реализована с помощью тахогенератора, на выходе которого формируется сигнал угловой скорости – производной от выходной координаты СЭГП – угла поворота горизонтальной платформы. Внешний контур замыкается при помощи линейных вращающихся трансформаторов, образуя главную отрицательную обратную связь, обеспечивающую угловое позиционирование поворотной платформы.

2. Синтез адаптивного регулятора

Экспериментальные исследования показали, что наиболее проблемным с точки зрения влияния параметрических возмущений на качество переходных процессов в СЭГП является силовой блок. В этот блок входят гидронасос и соединённый с ним системой шлангов исполнительный гидромотор. Для снижения чувствительности СЭГП к изменению параметров его силовой части предложено ввести в его структуру адаптивный регулятор (А регулятор) [4] (возможно вместо электронного усилителя), обеспечив при этом

компенсацию потери усиления в прямой цепи контура на уровне значения k_y . Все остальные элементы структуры СЭГП сохраняются на прежних местах.

Представим модель силового блока в упрощённом виде, пренебрегая постоянными времени электронного усилителя T_y и электрогидравлического усилителя T_{egy} . Имеем

$$T_k^2 \ddot{\theta} + 2\xi T_k \dot{\theta} + \theta = k\delta \quad (1)$$

$$t = 0: \theta(0) = \theta_0, \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0,$$

где θ – угол поворота горизонтальной платформы; $\delta = \theta_h - \theta$ – ошибка слежения;

$T_k, k_{\text{ок}}$, ξ – постоянная времени, коэффициент усиления и коэффициент затухания силового блока; $k = k_y k_{egy} k_{\text{ок}}$; k_y и k_{egy} – коэффициенты усиления электронного и электрогидравлического усилителя..

Далее, принимая $T_k^2 \approx 0$, приведём (1) к виду

$$\ddot{\theta} + a_1 \dot{\theta} = b_0 \delta, \quad (2)$$

$$t = 0: \theta(0) = \theta_0, \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0,$$

где $a_1 = 1/2\xi T_k$; $b_0 = k/2\xi T_k$.

Полученное уравнение (2) используем для конструирования закона адаптивного управления слежением [4].

Пусть ставится задача: найти аналитическое выражение для закона адаптивного управления слежением в замкнутой форме и соответствующую ему структуру А регулятора, формирующую управляющую функцию $u(t, \theta, \dot{\theta})$, обеспечивающую слежение выходной координаты $\theta(t)$ за входным процессом $\theta_h(t)$ таким образом, чтобы ошибка $\delta = (\theta_h - \theta)$ стремилась к нулю, а процесс, характеризующий её затухание при $\delta(t) \rightarrow 0$, удовлетворял дифференциальному уравнению эталонного процесса

$$\ddot{\delta} + h_1 \dot{\delta} + h_0 \delta = 0, \quad h_1, h_0 > 0 \quad (3)$$

с начальными условиями

$$t = 0: \delta = 1; \dot{\delta} = 0.$$

При этом искомое управление найдём из условия минимума функционала

$$J(u_2) = \frac{1}{2} [\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}(u_2)]^2, \quad (4)$$

где $\ddot{\theta}^*$, как следует из (3), определяется соотношением

$$\ddot{\theta}^* = \ddot{\theta}_h + h_1 \dot{\delta} + h_0 \delta. \quad (5)$$

и соответствует второй производной выходной координаты θ , при которой она точно повторяет задающий процесс θ_h .

Далее аналитическое построение искомого закона управления выполняется путём решения оптимизационной задачи в соответствии с функционалом (4) на основе решения уравнения скоростного градиента [5].

$$\frac{du_2}{dt} = -\lambda_2 \frac{\partial J(u_2)}{\partial u_2}. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) с нулевыми начальными условиями при использовании соотношений (4) и (5) приводит к аналитическому выражению для адаптивного закона управления слежением в виде

$$u(t) = K \left[h_0 \int_0^t (\theta_h - \theta) \tau d\tau + h_1 (\theta_h - \theta) + (\dot{\theta}_h - \dot{\theta}) \right], \quad (7)$$

$$K = \lambda b_0.$$

Структура А регулятора, соответствующая сконструированному закону управления (7), изображена на рис.2.

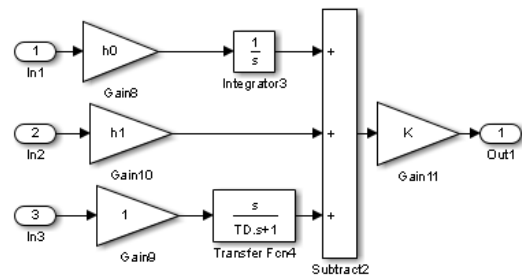


Рис. 2. Структурная схема (S-модель) А регулятора

Как следует из рис. 2, синтезированная структура полностью совпадает со структурой ПИД регулятора, и содержит все типичные для него элементы [6].

3. Синтез параметров настройки А регулятора

Сравнительный анализ синтезированной структуры А регулятора и структуры традиционного ПИД регулятора показывает, что они полностью совпадают. При этом следует отметить, что в соответствии с рис. 2, параметры эталонного процесса связаны с параметрами настройки типового ПИД регулятора следующими соотношениями:

$$k_p = h_1; \quad k_i = h_0; \quad k_d = 1.$$

Параметры h_1 и h_0 эталонного процесса (3) определяются требуемыми показателями качества СЭГП: временем установления t_p и коэффициентом затухания ζ , от которого зависит перерегулирование σ . При этом параметры настройки регулятора А находятся из соотношений

$$h_0 = \frac{1}{T^2}; \quad h_1 = \frac{2\zeta}{T},$$

где $T = \frac{t_p}{7}$ – постоянная времени эталонного процесса.

Параметры b_0 и λ , необходимые для вычисления коэффициента усиления K , находятся по формулам [4]

$$K = \lambda b_0; \quad \lambda = \frac{3}{b_0^2 t_{pa}},$$

где t_{pa} – время адаптации, которое определяется соотношением $t_{pa} = k_a t_p$, где, в свою очередь, $k_a = 0,1 \dots 0,9$; t_p – желаемое время переходной

характеристики СЭГП, которое задается в начале процедуры синтеза.

Таким образом, в качестве А регулятора для управления слежением можно использовать обычный ПИД регулятор совместно с электронным усилителем со следующими параметрами настройки

$$k_p = h_1 - \text{пропорциональная ветвь};$$

$$k_i = h_0 - \text{интегрирующая ветвь};$$

$$k_d = 1 - \text{дифференцирующая ветвь};$$

$$k_y = K - \text{усилитель, подключённый к выходу ПИД}$$

регулятора.

Следует отметить, что реальное дифференцирующее звено с постоянной времени T_D , изображённое на рис. 2, при установке А регулятора в контур СЭГП необходимо удалить, а на вход 3 ПИД регулятора подать сигнал с выхода тахогенератора, стоящего в контуре обратной связи.

4. Компьютерное моделирование

Моделирование выполнялось среде MATLAB & Simulink параллельно для двух систем – адаптивного СЭГП и привода-прототипа Д-213, схема моделирования которого (S-модель) приведена на рис. 1. Схема моделирования адаптивного СЭГП отличается от прототипа наличием дополнительного блока А регулятора, схема моделирования которого приведена на рис. 2, а также отсутствием (в случае удаления за ненадобностью) тахогенератора, установленного в канале входного сигнала прототипа. При этом параметры S-модели-прототипа имели следующие значения:

$$T_y = 0.00065; k_y = 5; k_{egy} = 2.93; T_{egy} = 0.06; T_k = 0.02;$$

$$k_{si} = 0.22; k_{wx} = 2; k_m = 0.001; T_m = 0.02; k_{oc} = 0.25;$$

$$k_d = 0.009; k_{red} = 1/244; k_d = 0.009; T_d = 0.02; k_{oc} = 0.25.$$

В качестве исходных данных для синтеза адаптивного регулятора приняты следующие значения $t_p = 1c$; $\zeta = 1$.

Для ввода данных в S-модель, а также расчёта параметров настройки А регулятора разработан m-файл с управляющей программой.

Экспериментальная часть моделирования включала исследование параллельной работы двух электроприводов при отработке линейно нарастающего входного сигнала с ограничением, как при отсутствии, так и при действии параметрических возмущений.

На рис. 3 и 4 показаны графики реакций приводов на ограниченный линейно нарастающий сигнал при отсутствии параметрических возмущений.

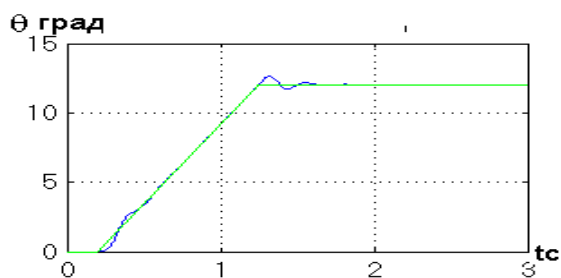


Рис. 3. Реакция СЭГП прототипа

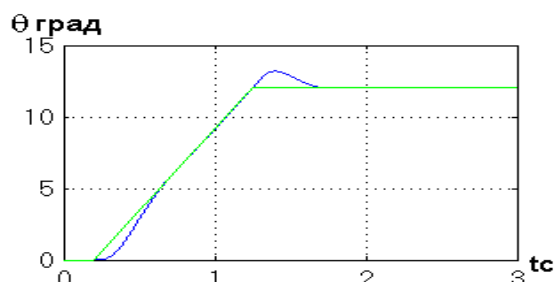


Рис. 4. Реакция адаптивного СЭГП

На рис. 5 и 6 показаны графики реакций приводов на ограниченный линейно возрастающий сигнал при снижении коэффициента демпфирования ξ силовой части до величины 0,05.

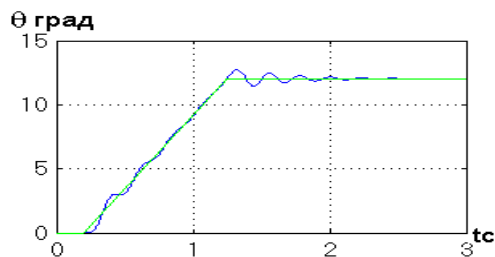


Рис. 5. Реакция СЭГП прототипа на параметрическое возмущение

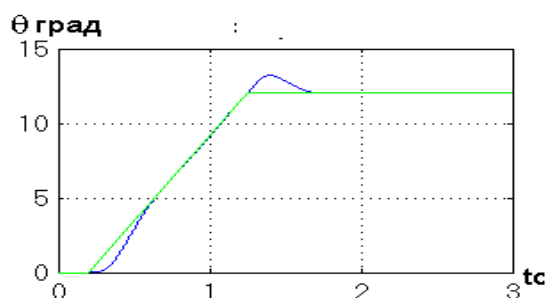


Рис. 6. Реакция адаптивного СЭГП на параметрическое возмущение

Заключение

Результаты компьютерного моделирования двух вариантов СЭГП, построенных на основе силовой пары «гидронасос – гидромотор», параметры которой как динамической системы существенно изменяются в процессе эксплуатации, продемонстрировали на реальном примере возможность снижения чувствительности электрогидравлических приводов к параметрическим

возмущениям за счёт применения технологии адаптивного управления. При этом для реализации предложенного закона управления не требуется постройка нового специализированного функционального устройства, а возможно использование традиционного ПИД регулятора путём установки значений параметров его настройки в соответствии с коэффициентами, входящими в выражение для закона адаптивного управления.

Литература

1. Патент 2203470 С2 RU МПК F41G5/04. Способ дистанционного управления скоростями и углами наведения артиллерийской установки и установка для его осуществления / Новоселов Б.В., Шаталов В.А., Кузнецов В.С. и др.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество Акционерная компания "Туламашзавод", Российская Федерация (RU). – № 2001102800/02; заявл. 30.01.2001; опубл. 27.04.2003. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2203470.html>.
2. Патент 2268480 С1 RU МПК G05B11/00. Следящий электрогидравлический привод / Новоселов Б.В., Кокошкин Н.Н., Левашов Б.И. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт "Сигнал" (ФГУП "ВНИИ "Сигнал"), Российская Федерация (RU). – № 2004114986/09; заявл. 17.05.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 02. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/226/2268480.html>.
3. Костин С.В. Рулевые приводы / С.В. Костин, Б.И. Петров, Н.С. Гамынин, – М.: Машиностроение, 1973, 208 с.
4. Краснодубец Л.А., Олейников А.М. ПИД регулятор как платформа для реализации адаптивных законов управления электроприводом. Мехатроника, автоматизация, управление, 2016, Том 17, № 12, С, 809–815.
5. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах, СПб.: Изд-во СПб университета, 2001, 244с.
6. Visioli A. Practical PID Control. Advances in Industrial Control, Springer, 2006, 310 p.

References

1. Patent 2203470 С2 RU IPC F41G5/04. A method for remote control of speeds and angles of guidance of an artillery complex and an installation for its implementation [Sposob distancionnogo upravleniya skorostyami i uglami navedeniya artustanovki i ustanovka dlya ego osushchestvleniya]. Novoselov B. V., Shatalov V. A., Kuznetsov V. S. and others; applicant and patent holder open joint-stock company "Tulamashzavod", Russian Federation (RU). – no. 2001102800/02; application 30.01.2001; publ. 27.04.2003. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2203470.html>.
2. Patent 2268480 С1 RU IPC G05B 11/00. Tracking electro-hydraulic drive [Sledyashchij elektrogid-ravlicheskiy privod]. Novoselov B. V., Kokoshkin N. N., Levashov B. I. et al.; applicant and patent holder Federal state unitary enterprise "all-Russian research Institute "signal" (FSUE "VNIИ "Signal") Russian Federation (RU). – no. 2004114986/09; application 17.05.2004; publ. 20.01.2006, bul. no.02. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.findpatent.ru/patent/226/2268480.html>.
3. Kostin S. V. Steering drives [Rulevye privody]. S. V. Kostin, B. I. Petrov, N. S. Gamynin. - Moscow: Mashinostroenie, 1973, 208 p.
4. Krasnomovets L. A., Oleinikov A. M. PID controller as a platform for the implementation of adaptive control laws of the electric drive [PID regulyator kak platforma dlya realizacii adaptivnyh zakonov upravleniya elektroprivodom]. Mechatronics, automation, control, 2016, Vol. 17, No. 12, S. 809-815.
5. Antonov V. N., Terekhov V. A., Tyukin I. Y. Adaptive management in technical systems [Adaptivnoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemah]. SPb.: publishing house of Saint Petersburg University, 2001, 244 p.
6. Visioli A. Practical PID Control. Advances in Industrial Control, Springer, 2006, 310 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Андреевич Краснодубец, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33. Главный научный сотрудник Института природно-технических систем, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28, e-mail: lakrasno@gmail.com

Leonid A. Krasnodubets, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department «Ship's electric equipment», Sevastopol state University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation. Chief Researcher of the Institute of Natural and Technical Systems, Lenin St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation, e-mail: lakrasno@gmail.com

Светлана Андреевна Конева, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: ksa@mail.ru

Владимир Муратович Цалоев, доцент кафедры «Судовое электрооборудование», Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: 1._@mail.ru

Svetlana A. Koneva, Ph.D. (Eng), associate professor, head of the department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: ksa@mail.ru

Vladimir M. Tsaloev, associate professor of the Department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation, e-mail: 1._@mail.ru

УДК 656.62: 504.4.054

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.022

Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан

Е.А. Батанина¹, А.Н. Бородин¹, О.Л. Домнина¹, А.Е. Пластинин¹¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье решается задача по определению границ участков концентрации транспортных происшествий с участием судов на реках Волге и Каме в границах республики Татарстан. Для этого создана база данных по транспортным происшествиям с участием различных видов флота за период наблюдения с 2007 по 2018 г. Методика определения границ участков концентрации транспортных происшествий основывается на расчете плотности транспортных происшествий на участках с различными условиями формирования рисков и сравнении ее с усредненным количеством транспортных происшествий на исследуемых участках водного пути, а также последующей проверке гипотезы о нормальности эмпирического распределения количества транспортных происшествий на участках с повышенной плотностью транспортных происшествий. Границы участков определены при уровне значимости равном 0,05. В результате выполненных исследований выявлено наличие 13 участков концентрации транспортных происшествий на рассматриваемых водных объектах, установлено наличие значительных смещений границ участков концентрации транспортных происшествий на реке Волге при рассмотрении различных периодов наблюдения с 1980 по 2018 г., сделаны предложения по практическому применению полученных результатов и дальнейшему совершенствованию методики определения границ участков концентрации транспортных происшествий в части применения методов непараметрической статистики, вариантов оценки плотности транспортных происшествий и учета субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: транспортные происшествия, участки концентрации, оценка смещения границ, водный транспорт, республика Татарстан, риск; безопасность.

Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan

Ekaterina A. Batanina¹, Alexey N. Borodin¹, Olga L. Domnina¹, Andrey E. Plastinin¹¹Volga State University of Water Transport

Abstract. The article solves the problem of determining the boundaries of areas of concentration of transport accidents involving ships on the Volga and Kama rivers within the borders of the Republic of Tatarstan. For this purpose, a database was created on transport accidents involving various types of fleet for the observation period from 2007 to 2018. The method for determining the boundaries of traffic accident concentration areas is based on calculating the traffic accident density in areas with different risk formation conditions and comparing it with the average number of traffic accidents in the studied sections of the waterway, as well as subsequent testing of the hypothesis about the normality of the empirical distribution of the number of traffic accidents in areas with high traffic accident density. Plot boundaries are defined at a significance level of 0.05. As a result of performed studies revealed the presence of 13 areas of concentration of accidents in the considered water bodies, the presence of significant movement of boundaries of the areas of concentration of traffic accidents on the Volga river when considering different time periods from 1980 to 2018 made suggestions on the practical application of the obtained results and the further improvement of a technique of definition of boundaries of the areas of concentration of accidents in the application of methods of nonparametric statistics, options for assessing the density of traffic accidents and accounting for the subjects of the Russian Federation.

Keywords: transport accidents, concentration areas, border displacement assessment, water transport, Republic of Tatarstan, risk; safety

Введение

В целях обеспечения безопасности существует необходимость в сборе, обработке и анализе данных по транспортным происшествиям (ТП).

Под транспортными происшествиями согласно Положению по расследованию, классификации и учету происшествий на внутренних путях (Приказ Минтранса РФ от 29 декабря 2003 г. N 221 в ред. от 27.12.2010) понимается столкновение судов, составов; удар судна с другим стоящим у берега, причала или на якоре судном, о берег, гидротехническое сооружение и др. препятствиями; затопление судов; посадка их на мель; повреждение гидротехнических сооружений.

Данная работа является дополнением ранее опубликованных работ авторов «Оценка экологического риска транспортных происшествий на

водных объектах» [1] и «Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан» [2]. За рамками указанных работ осталось объяснение методики определения границ участков концентрации транспортных происшествий (УКТП) и процедуры ее применения, для оценки экологического риска ТП использовались только результаты определения УКТП [1-2].

Кроме этого, представляется целесообразным выполнение оценки смещения границ УКТП на основе статистических данных за различные периоды наблюдения.

Актуальность определения УКТП определяется следующими обстоятельствами:

- необходимостью учета полученных границ при определении риска ТП [2];

- для разработки организационных и технических мероприятий по снижению уровня экологического риска.

Исследованиям по оценке экологических последствий ТП, определению участков концентрации этих происшествий посвящены работы как отечественных [4,5,6,7,8], так и зарубежных ученых [9,10,11,12,13,14,15].

Большинство работ посвящено решению рассматриваемой задачи для морских условий, в то время как внутренним водным путям уделено недостаточно внимания.

При этом часть исследователей в своих работах уделяет внимание определению границ УКТП [6,14,15]. Они рассчитывают коэффициенты аварийности, определяют риск с помощью математических моделей движения судов. Оставшаяся часть исследователей определяет вероятность аварий на основе имеющейся статистики в привязке к плотности движения и числом встреч судов.

В связи отсутствием исследований в области определения границ УКТП на внутренних водных путях на основе современных данных за последние 10 лет на фоне существенного изменения условий судоходства для объектов внутреннего водного транспорта авторами предложена методика определения таких границ и описание распределения количества ТП на участках концентрации.

Цель представленного исследования: выявление факторов, влияющих на расположение УКТП и формирование подходов к обрабатываемой информации при оценке рисков возникновения ТП и разработке защитных организационных и технических мероприятий.

Для реализации указанной цели нами были поставлены следующие задачи:

- детальное описание процедуры выявления УКТП для обеспечения возможности воспроизведения полученных результатов другими исследователями для разных водных объектов (морских и речных акваторий);
- оценка смещения границ УКТП в пространстве и времени для учета этих факторов при расчете риска и разработке организационных и технических мероприятий снижения уровней рисков.

Материалы и методы

Для того чтобы определить границы УКТП, необходимо использовать сравнение плотности ТП на участках водного пути с различными условиями формирования рисков возникновения ТП и усредненного количества ТП на *i*-том километре реки за ряд лет.

Для дальнейших исследований проводится проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения ТП на участках с повышенной плотностью ТП. В качестве случайной величины рассматривается километр водного пути, где зарегистрированы случаи ТП.

Если распределение исследуемой случайной величины характеризуется законом нормального распределения, то данный участок является УКТП. Если распределение отличается от нормального, то это свидетельствует о существовании как минимум

двух УКТП. Поэтому необходимо разбиение этого участка на УКТП (два и более).

В данной работе статистические исследования по описанной методике выполнены для рек Волги и Камы в границах республики Татарстан.

1. Определение плотности ТП на исследуемых участках реки Волга и Кама

Для построения диаграммы распределения ТП по реке Волге собраны статистические данные Администрации Волжского бассейна внутренних водных путей за временной интервал – 12 лет (с 2007 по 2018гг.), так как согласно теории статистики для обеспечения репрезентативности и получения достоверных результатов период наблюдений должен быть не менее 10 лет. Количество зафиксированных случаев на участке реки Волги в границах республики Татарстан составило 70, на участке реки Камы 47. Для определения распределения аварийных случаев не используются ТП, которые произошли на боковых реках.

Для определения плотности концентрации ТП разделим исследуемый водный путь в границах республики Татарстан (это реки Волга (1269-1468 км) и Кама (1380 км-1582,5 км)) на участки с различными условиями формирования уровней рисков, т.е. различающиеся гидрологическими условиями, габаритами судового хода, типом навигационного ограждения, а также интенсивностью движения.

Выделим 3 основных участка водного пути на реке Волге.

1. Речной участок - 1269-1313 км общей длиной $L_p = 44$ км.
2. Озерно-речной участок - 1314–1370 км. Его общая длина $L_{op} = 56$ км.
3. Озерный участок -1317 – 1468 км общей длиной $L_{oz} = 97$ км.

На реке Каме выделим 2 основных участка: озерный - 1380- 1510 км длиной $L_{oz} = 130$ км; и речной - 1511-1582,5 км.

На следующем этапе определили плотность ТП на характерных участках для дальнейшего сравнения их с усредненным количеством ТП на каждом километре реки.

При этом на реке Волге плотности ТП составят:

1. На речном участке при наличии $N_p = 27$ ТП за 12 лет, плотность ТП выразится формулой

$$K_p = \frac{N_p}{L_p} = \frac{27}{44} = 0,6;$$

2. На озерно-речном участке при наличии $N_{op} = 25$ ТП за рассматриваемые 12 лет, плотность ТП равна

$$K_{op} = \frac{N_{op}}{L_{op}} = \frac{25}{56} = 0,45 ;$$

3. На озерном участке при наличии $N_{oz} = 18$ ТП за рассматриваемый период, плотность ТП равна

$$K_o = \frac{N_o}{L_o} = \frac{18}{97} = 0,2;$$

На реке Каме при рассмотрении данных за аналогичный 12 летний период плотность ТП на озерном участке составила

$$K_o = \frac{N_o}{L_o} = \frac{47}{130} = 0,4.$$

Речной участок реки Камы нами не рассматривался, поскольку в исследуемом периоде там практически отсутствуют ТП.

Путем применения метода пятичленной скользящей средней полученные данные усредняются, с целью выделения УКТП.

2. Определение границ участков с повышенной плотностью ТП

Определение границ участков с повышенной плотностью ТП на характерных участках реки Волги производилось при следующих условиях:

1. На речном участке при $k_{\text{ср}} \geq 0,6$ количество участков с повышенной плотностью ТП составило 2.

2. На озерно-речном участке при $k_{\text{ср}} \geq 0,45$ количество участков с повышенной плотностью ТП составило 1.

3. На озерном участке при $k_{\text{ср}} \geq 0,2$ – количество участков с повышенной плотностью ТП составило 4.

Общее количество участков с повышенной плотностью ТП на реке Волге составило 7 участков.

Количество участков с повышенной плотностью ТП на озерном участке реки Камы при условии $k_{\text{ср}} \geq 0,4$ составило 5.

На рис. 1 и 2 показано распределение количества ТП на каждом километре реки Волги и Камы в границах республики Татарстан.

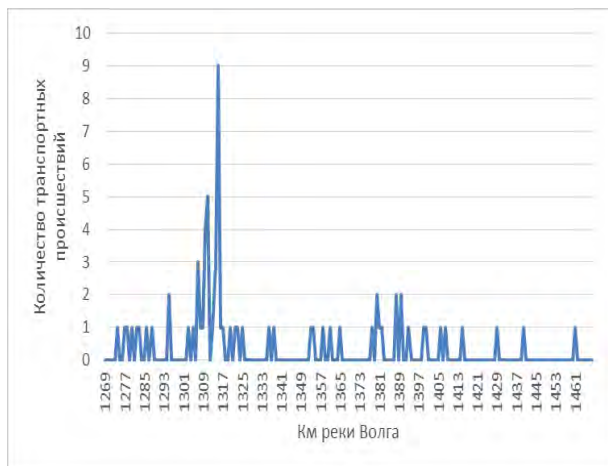


Рис.1. Диаграмма ТП на участке 1269-1468 км реки Волги

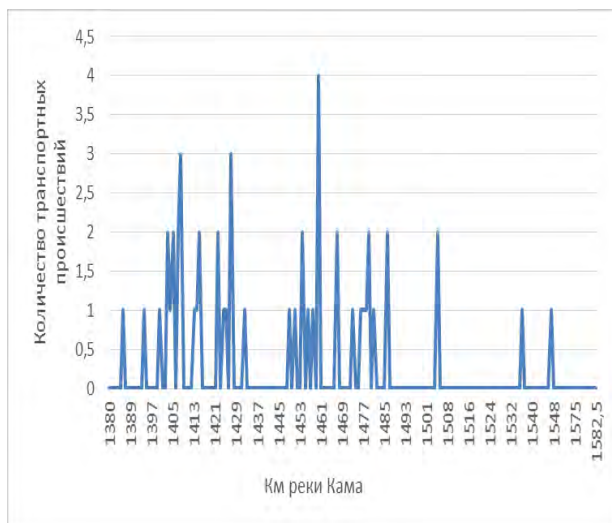


Рис.2. Диаграмма ТП на участке 1380-1582,5 км реки Камы

Диаграммы распределения усредненных значений плотности ТП на каждом километре рек

Волги и Камы в границах Татарстана представлены на рис.3 -4.

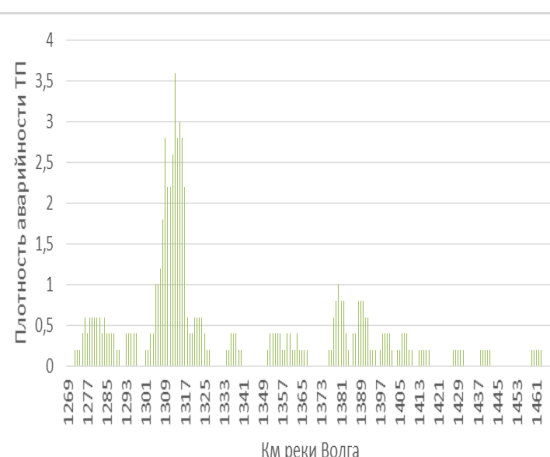


Рис.3. Диаграмма распределения усредненных значений плотности ТП на каждом километре реки Волги в границах республики Татарстан

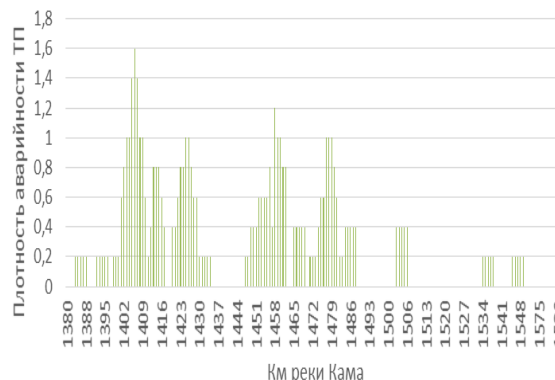


Рис.4. Диаграмма распределения усредненных значений плотности ТП на каждом километре реки Камы в границах республики Татарстан

Как видно на рис. 3, на речном 1269-1313 км реки Волги существует, два участка с повышенной плотностью ТП; на озерно-речном участке 1314–1370 км реки Волги один участок с повышенной плотностью ТП; на озерном участке 1317 – 1468 км существует четыре участка с повышенной плотностью ТП. Дислокации ТП перечисленных участков показаны в табл. 1.

Таблица 1

Расположение участков с повышенной плотностью ТП с координатами на реке Волге

№ участка	Расположение участка, км	Протяженность участка, км	Количество случаев
1.	1277,0-1288,0	8	5
2.	1303,0-1313,0	8	16
3.	1314,0-1320,0	11	18
4.	1322,0-1325,0	8	5
5.	1353,0-1365,0	9	5
6.	1378,0-1382,0	5	2
7.	1388,0-1393,0	6	2

На озерном участке реки Камы как видно из рис. 4, пять участков с повышенной плотностью ТП, дислокация которых приведена в табл. 2.

Таблица 2

Расположение участков с повышенной плотностью ТП с координатами на реке Каме

№ участка	Расположение участка, км	Протяженность участка, км	Количество случаев
1.	1403-1408	5	10
2.	1413-1415	2	4
3.	1422-1427	5	7
4.	1449-1460	11	10
5.	1476-1481	5	6

3. Проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения ТП на участках с повышенной плотностью ТП

Для дальнейших исследований проводится проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения ТП на участках с повышенной плотностью ТП с помощью критерия Шапиро-Уилка с применением программы STATISTICA 8.0.

Гипотеза о нормальном распределении проверяется по каждому из выделенных участков с повышенной плотностью ТП.

Если распределение ТП на полученном участке отличается от нормального, то разбиваем его на несколько участков. После разбиения проверяем гипотезу о нормальном распределении по каждому из полученных участков. Выполненный анализ показан на рис. 5-12.

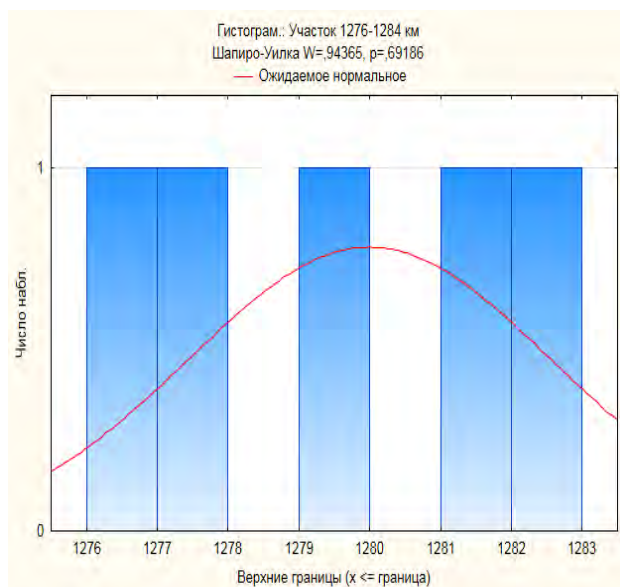


Рис. 5. Гистограмма распределения ТП на участке 1276-1284 км реки Волги.

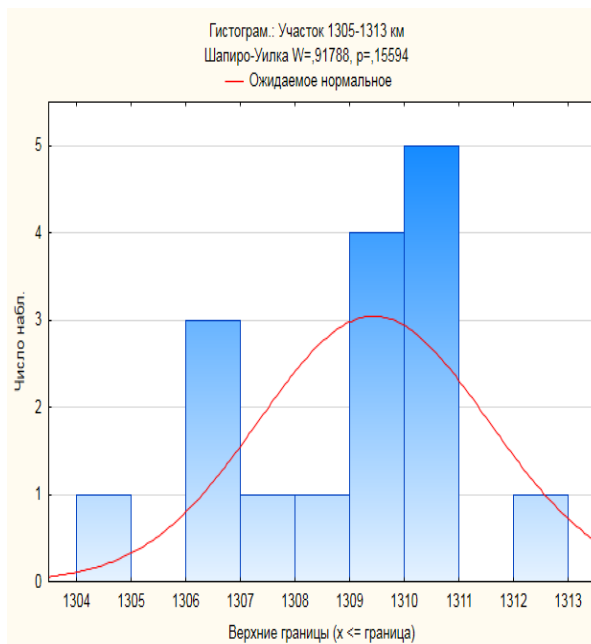


Рис. 6. Гистограмма распределения ТП на участке 1303-1313 км реки Волги

Рис. 5 и 6 подтверждают гипотезу о нормальности эмпирического распределения, так как $p > 0.05$.

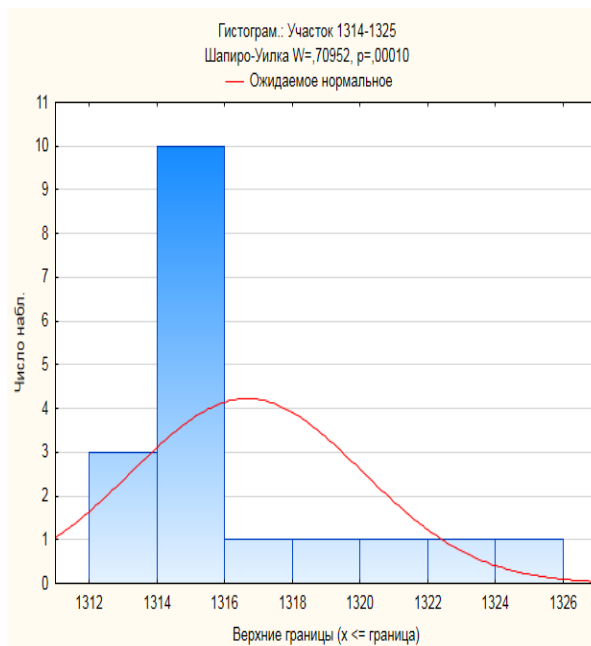


Рис. 7. Гистограмма распределения ТП на участке 1314-1325 км реки Волги

Гипотеза о нормальности эмпирического распределения на рис. 7 не подтверждается, так как $p < 0.05$. Следовательно, на этом участке можно выделить как минимум два отдельных участка:

- 1) 1314-1318 км.
- 2) 1320-1325 км

Результаты проверки обозначенных участков показаны на рис. 8 и 9.

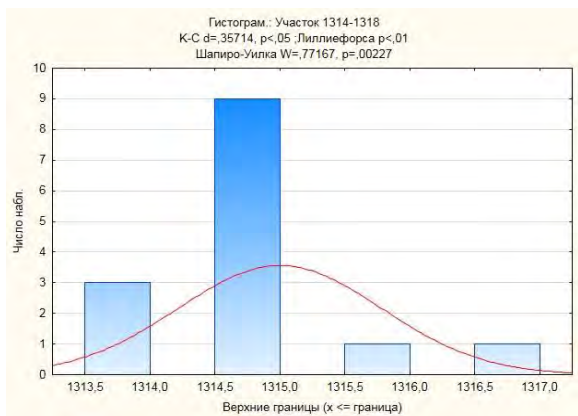


Рис. 8. Гистограмма распределения ТП на участке 1314-1318 км реки Волги.

Гипотеза о нормальности эмпирического распределения на рис. 8 не подтвердилась, так как $p < 0.05$. Следовательно, для определения границ УКТП можно использовать методы непараметрической статистики (95 % процентиль), поскольку дальнейшее дробление участков нецелесообразно из-за ограничений паспорта критериев. Гистограмма на рис. 9 наоборот подтвердила гипотезу о нормальности.

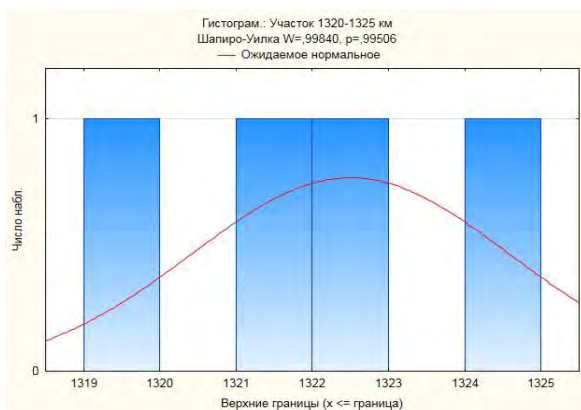


Рис. 9. Гистограмма распределения ТП на участке 1320-1325 км реки Волги

На всех остальных участках гипотеза о нормальности эмпирического распределения также подтверждается. Аналогичную проверку провели на реке Каме (рис. 10-12), где выдвинутая гипотеза также подтвердилась.

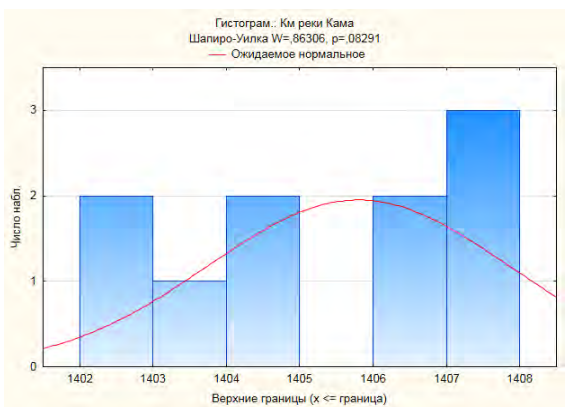


Рис. 10. Гистограмма распределения ТП на участке 1403-1408 км реки Камы

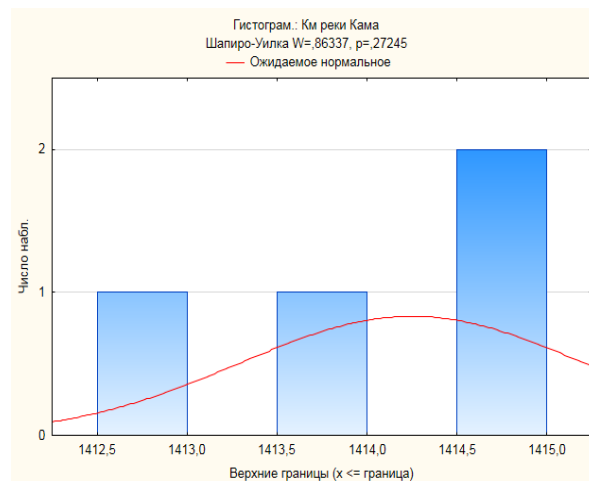


Рис. 11. Гистограмма распределения ТП на участке 1403-1408 км реки Камы

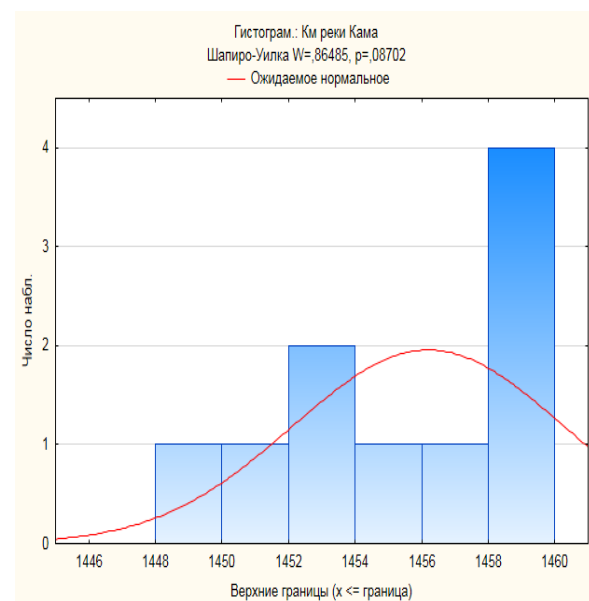


Рис. 12. Гистограмма распределения ТП на участке 1449-1460 км реки Камы

Таким образом, были получены 8 УКТП на реке Волге и 5 УКТП на реке Каме.

Далее определяем границы УКТП и выборочные средние координат ТП с применением компьютерной программы STATISTICA 8.0.

Результаты определения границ УКТП (5 и 95 процентиль) представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3
Границы УКТП на реке Каме в границах республики Татарстан

N	Граница УКТП, км	Выборочная средняя координаты ТП, км
1.	1403-1408	1405,8
2.	1413-1415	1414,25
3.	1422-1427	1424,9
4.	1449-1460	1456,2
5.	1476-1481	1478,3

Таблица 4

Границы УКТП на реке Волге в границах республики Татарстан

№	Граница УКТП, км	Выборочная средняя координаты ТП, км
1.	1190,0-1190,0	1190
2.	1277,0-1288,0	1282
3.	1303,0-1313,0	1309,1
4.	1314,0-1320,0	1315,3
5.	1322,0-1325,0	1323,3
6.	1353,0-1365,0	1358,2
7.	1378,0-1382,0	1380,2
8.	1388,0-1393,0	1389,8
9.	1527,0-1528,0	1527,4

При сопоставлении выявленных УКТП в данном исследовании (период наблюдения 2007-2018 гг.) с предыдущим исследованием за более ранний анализируемый период наблюдения 1980-2008 гг. [6] выявлено значительное смещение УКТП (табл.4). Для оценки степени смещения УКТП приняли в качестве примера реку Волгу (проанализированную в обоих исследованиях) и определили значение абсолютного и относительного смещения участков. Абсолютное смещение оценивалось как разность выборочных средних координат ТП ближайших участков из разных периодов наблюдения. Для получения относительных смещений в качестве весов применялась усредненная длина ближайших участков из разных периодов наблюдения. Для оценки смещений УКТП расположенных на границе республики Татарстан в табл. 4 включены данные по ТП в соседних субъектах Российской Федерации.

Таблица 5

Сопоставление УКТП на реке Волга в границах республики Татарстан в пространственном и временном аспекте

Период наблюдения 1980-2008		Период наблюдения 2007-2018		Абсолютное смещение, км	Относительное смещение, %
Граница УКТП, км	Выборочная средняя координаты ТП, км	Граница УКТП, км	Выборочная средняя координаты ТП, км		
1191,3-1193,4	1192,4	1190,0-1190,0	1190	2,4	154,8
1234,2-1236,5	1235,3	-	-	45,3	2745,5
1245,1-1246,5	1245,8	-	-	36,2	583,9
1276,8-1280,1	1278,5	1277,0-1288,0	1282	3,5	49
1289,4-1291,0	1290,2	-	-	8,2	130,2
1295,2-1296,6	1295,9	-	-	13,2	231,6
1312,2-1313,9	1313,1	1303,0-1313,0	1309,1	4	68,4
-	-	1314,0-1320,0	1315,3	2,2	57,1
-	-	1322,0-1325,0	1323,3	10,2	434
-	-	1353,0-1365,0	1358,2	23,3	304,6
1379,9-1383,2	1381,5	1378,0-1382,0	1380,2	1,3	35,6
-	-	1388,0-1393,0	1389,8	8,3	197,6
1399,9-1405,8	1402,8	-	-	13	238,5
1441,3-1444,0	1442,6	-	-	52,8	1371,4
1446,9-1452,7	1449,8	-	-	60	1111,1
1454,7-1459,6	1457,2	-	-	67,4	1361,6
1470,6-1473,8	1472,2	-	-	55,2	2628,6
1484,9-1486,1	1485,5	-	-	41,9	3809,1
1499,0-1505,2	1502,1	-	-	25,3	702,8
1527,2-1530,2	1528,7	1527,0-1528,0	1527,4	1,3	65

Заключение

В ходе исследования описана процедура выявления УКТП и оценка смещения выявленных участков в пространстве с учетом периода наблюдения.

Если статистика ТП с 1980 по 2008 годы выявила 16 таких участков, то статистика 2007-2018 годов показала их сокращение до 9. Помимо сокращения

количество УКТП, наблюдается и их существенное смещение (от 1,3 до 60 км), одни участки исчезли (например, 1289,4-1291,0 км; 1295,2-1296,6 км), появились ранее не зарегистрированные участки (например, 1314,0-1320,0 км; 1322,0-1325,0 км; 1353,0-1365,0 км).

Данное наблюдение свидетельствует о необходимости регулярного мониторинга УКТП и использования разных подходов к периоду

наблюдения УКТП в зависимости от поставленных целей.

Для разработки оперативных мероприятий по предотвращению риска транспортных происшествий, например в рамках регулирования движения и стоянки судов, необходимо ориентироваться на данные полученные в актуальный период наблюдения (последние 10-15 лет).

В случае же разработки организационных и технических мероприятий по снижению уровня риска (например, для тренажерной подготовки спасателей, штабных учений и др.), период наблюдений должен охватывать как можно больший интервал (желательно 30 лет и более). Кроме этого целесообразно варьировать различные периоды наблюдения, чтобы выявлять максимальное количество участков с учетом исчезающих и появляющихся участков. Данная задача особенно актуальна при разработке мероприятий по снижению уровня риска для участков, на которых расположены водозаборы, гидротехнические сооружения атомных электростанций и другие объекты приоритетной защиты.

К сожалению, разработчики объектовых и бассейновых планов по предупреждению и

ликвидации разливов нефти, правил плавания не учитывают при оценке рисков и разработке защитных мероприятий выявленные особенности УКТП.

В дальнейших исследованиях необходимо:

- провести анализ УКТП по всем субъектам Российской Федерации Волжского бассейна;
- определить признаки и разработать систему классификаций УКТП для выявления постоянных (незначительно смещающихся участков), подвижных во времени, подвижных в пространстве УКТП; по ожидаемому ущербу, чтобы учитывать наряду с частотой тяжести последствий ТП; по протяженности УКТП для разработки защитных мероприятий, в т.ч. при реализации ТП на трансграничном участке;
- в целях дальнейшего совершенствования методики определения границ УКТП в части применения методов непараметрической статистики рекомендуется использовать 95 % процентиль и медиану, поскольку в ряде случаев дробление участков нецелесообразно из-за ограничений паспорта критериев; ввести в методику вариант оценки плотности ТП в субъекте Российской Федерации.

Литература

1. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-4 (42). С. 79-86
2. Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Батанина Е.А., Наумов В.С. Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан. Морские интеллектуальные технологии. 2019. №4-2 (46). С. 79-84
3. Алешин И.В., Гончаров В.К., Зуева Е.С., Портной А.С. Безопасность морских технологий: обеспечение экологической безопасности морских технологий. Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. № 2 (36). С. 11-16.
4. Булгаков С.П., Дудолодов А.А., Тройнов О.С. Анализ аварийных случаев, связанных с применением методов судовождения на внутренних водных путях ЕГС РСФСР / Науч.-техн. информ. сб./ЦБНТИ РТ. - 1991. - Вып. 7. - С.10-21
5. Дмитриев В.Г. Оценка экологического риска. Аналитический обзор публикаций. Арктика и Север. 2014. № 14. С. 126-147.
6. Наумов В.С., Бородин А.Н. Методика определения расположения потенциальных источников разлива нефти и нефтепродуктов на внутренних водных путях при эксплуатации судов Речной транспорт (XXI век). 2009. № 5 (41). С. 81-83
7. Лентарев А.А., Монинец С.Ю. Проблемы прогнозирования риска разливов нефти на море. монография / А. Лентарев, С. Ю. Монинец ; Гос. морской ун-т им. адмирала Г. И. Невельского, Ин-т защиты моря. Владивосток, 2006. 122 с.
8. Этин В.Л., Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Васькин С.В., Лукина Е.А., Сосенков Ф.С. Организация борьбы с разливами нефти на внутренних водных путях. Монография. Нижний Новгород, 2015. 292 с.
9. Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. 2019. p. 227-245
10. Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. Journal of Environmental Protection and Ecology. 2012. 13(3 A), p. 1751-1759
11. Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters. 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. 2017, p. 286-308
12. Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; Amjadi Hazhir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran). Environmental science and pollution research international. 2020. Volume 27 Issue 28. p.35814-35827. DOI:10.1007/s11356-020-09886-8
13. Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters. Marine pollution bulletin. Volume 153. p.111001; DOI:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
14. Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyu Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective. Environmental science & technology. 2020. Volume 54 Issue 4. p.2112-2121; DOI:10.1021/acs.est.9b07086
15. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; Guo Jie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. Marine pollution bulletin. 2016. Volume 110 Issue 1. p.194-202; DOI:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062

References

1. Domnina O. L., Zakharov V. N., Otdelkin N. S., Plastinin A. E. Assessment of environmental risk of traffic accidents on water bodies. *Marine intellectual technologies*. 2018. Volume 2 Issue 4. p. 79-86
2. Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Ekaterina A. Batanina, Viktor S. Naumov Risk assessment of transport accidents on rivers in the borders of the republic of Tatarstan. *Marine intellectual technologies*. 2019. №4-2 (46). p. 79-84
3. Aleshin I. V., Goncharov V. K., Zueva E.S., Portnoy A. S. Safety of marine technologies. *Marine environment protection. Marine intellectual technologies*. 2017. T. 1. № 2 (36). p. 11-16.
4. Bulgakov S.P., Dudoladov A.A., Troynov O.S. Analysis of accidents associated with the use of navigation methods on inland waterways of the Unified State System of the RSFSR / *Nauch.-Tekhn. inform. Sat / TsBNTI RT*. - 1991. - Issue. 7. - P.10-21
5. Dmitriev V.G. Environmental risk assessment. Analytical review of publications. 2014. *Arctic and North*. № 14. p. 126-147.
6. Naumov V.S., Borodin A.N. Methodology for determining the location of potential sources of oil and oil products spills on inland waterways during the operation of vessels. 2009. *River transport (XXI century)*. № 5 (41). p. 81-83
7. Lentarev A.A., Moninets S.Yu. Problems of predicting the risk of oil spills at sea. monograph / A. A. Lentarev, S. Yu. Moninets; State marine un-t them. Admiral G. I. Nevelskoy, Institute of Sea Protection. Vladivostok, 2006. 122p.
8. Etin V.L., Cheban E.Yu., Ivanov V.M., Vaskin S.V., Lukina E.A., Sosonkov F.S. Organization of oil spill response on internal routes. Monograph. Nizhny Novgorod, 2015. 292 p.
9. Creber, D.J., Eldridge, L., Van Der Tak, C., Duursma, M. Review of international ship-source hazardous and noxious substances risk assessments. *Proceedings - 42nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response*. 2019. p. 227-245
10. Gasparotti, C., Rusu, E. Methods for the risk assessment in maritime transportation in the black sea Basin. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2012. 13(3 A), c. 1751-1759
11. Creber, D.J. Koldenhof, Y. Frequency of spill model for area risk assessment of ship-source oil spills in Canadian waters. 40th AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response. 2017, c. 286-308
12. Ebrahimi Baha; Ahmadi Salman; Chapi Kamran; Amjadi Hahzir Risk assessment of water resources pollution from transporting of oil hazardous materials (Sanandaj-Marivan road, Kurdistan Province, Iran). *Environmental science and pollution research international*. 2020. Volume 27 Issue 28. p.35814-35827. DOI:10.1007/s11356-020-09886-8
13. Sajid Zaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters. *Marine pollution bulletin*. Volume 153. p.111001; DOI:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
14. Helle Inari; Makinen Jussi; Nevalainen Maisa; Afenyo Mawuli; Vanhatalo Jarno. Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective. *Environmental science & technology*. 2020. Volume 54 Issue 4. p.2112-2121; DOI:10.1021/acs.est.9b07086
15. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; Guo Jie; Tang Cheng; Hu Xiaoke; Wang Chuanyuan; Li Baoquan Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. *Marine pollution bulletin*. 2016. Volume 110 Issue 1. p.194-202; DOI:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Екатерина Александровна Батанина, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ea-batanina@yandex.ru

Алексей Николаевич Бородин, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: expertrisk@yandex.ru

Ольга Леонидовна Домнина, кандидат технических наук, доцент, научный секретарь, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Андрей Евгеньевич Пластинин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

Ekaterina A. Batanina, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: ea-batanina@yandex.ru

Alexey N. Borodin, Ph.D.(Eng), Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: : expertrisk@yandex.ru

Olga L. Domnina, Ph.D.(Eng), Associate Professor, Scientific Secretary, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Andrey E. Plastinin, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 519.872.6

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.023

Возможности автоматических транспортеров-погрузчиков и их использование при создании имитационной модели развития контейнерного терминала

А.С. Свистунова¹, Д.С. Хасанов¹¹Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр РАН

Аннотация. С ростом количества контейнеров, перевозимых морскими судами, выросли общемировые объемы контейнерных перевозок. Для повышения эффективности переработки контейнеров используют схемы с разбивкой складской площади со штабелями контейнеров на равные части. Перспективным направлением развития указанных транспортных средств является разработка автономных роботизированных транспортных систем. Используются автоматизированные транспортные платформы (AGV) или автоматизированные транспортёр-погрузчики (ALV). Преимуществами автоматизации контейнерных перевозок на терминале является реализация безопасных условий работы для докеров и водителей грузовиков. Было проведено сравнение возможностей AGV и ALV. Сравнение энергопотребления автоматических транспортеров-погрузчиков. Характеристики кранов, используемых при обработке контейнеров. Функциональные возможности рассмотренных автоматических транспортеров-погрузчиков были использованы при создании имитационной модели в программной среде AnyLogic. В результате проведенного моделирования можно сделать вывод о возможности значительного увеличения работоспособности системы. Для эффективной реализации указанных преимуществ необходимо использовать имитационное моделирование функциональных процессов контейнерного терминала, позволяющее выбрать научно обоснованный вариант развития и внедрения в практическую деятельность перспективных средств автоматизации.

Ключевые слова: логистика, имитационное моделирование, контейнерный терминал, транспортёр-погрузчик, Anylogic, краны-перегрузчики, козловой кран.

Features of automatic conveyor loaders and their use in creating a simulation model of container terminal development

Alexandra S. Svistunova¹, Dmitry S. Khasanov¹¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract. With the increase in the number of containers carried by sea vessels, the global volume of container traffic has increased. To increase the efficiency of container processing, use schemes with a breakdown of the warehouse area with stacks of containers into equal parts. A promising direction for the development of these vehicles is the development of Autonomous robotic transport systems. Automated transport platforms (AGV) or automated conveyor loaders (ALV) are used. The advantages of container transport automation at the terminal are the implementation of safe working conditions for dockers and truck drivers. The capabilities of AGV and ALV were compared. Comparison of energy consumption of automatic conveyor loaders. Characteristics of cranes used for handling containers. The functionality of the considered automatic conveyor loaders was used to create a simulation model in the AnyLogic software environment. As a result of the simulation, we can conclude that a significant increase in system performance is possible. To effectively implement these advantages, it is necessary to use simulation of functional processes of a container terminal, which allows you to choose a scientifically based option for the development and implementation of advanced automation tools in practice.

Key words: logistics, simulation, container terminal, loader conveyor, Anylogic, cranes, gantry crane.

Введение

По данным ассоциации по Торговле и Развитию при Организации Объединенных Наций, за последние время объем контейнерных перевозок грузов увеличивался примерно на 9,8 % каждый год. Так, в 2019 году количество перевезенных грузов выросло на 3,28% по сравнению с предыдущим годом, а на контейнеры пришлось более 70 % (в стоимостном выражении) мировых товаров, перевозимых морем.

С ростом количества контейнеров, перевозимых морскими судами, выросли общемировые объемы контейнерных перевозок, в том числе не морскими видами транспорта (железнодорожным, автомобильным, речным), которые вместе с морским

транспортом и морскими терминалами являются звеньями единой транспортной системы.

Постоянно увеличивающийся грузооборот требует модернизации и переоборудования контейнерных терминалов (КТ), расположенных как в портах, так и внутри континентов; изменения их складской инфраструктуры; оснащения высокопроизводительными кранами-перегрузчиками (основное грузоподъемное оборудование, необходимое для работы с судами-контейнеровозами эксплуатирующихся типов) и другими грузоперерабатывающими вспомогательными средствами (ж/д и автомобильными платформами и т.п.).

Необходимость переработки большого количества одновременно складированных контейнеров оказывает существенное влияние на

складскую инфраструктуру современных терминалов. Для повышения эффективности переработки контейнеров используют схемы с разбивкой складской площади со штабелями контейнеров на равные части. Полученные складские площадки обслуживаются системой транспортно-перегрузочного оборудования, в чьи функции входит перемещение контейнеров по цепочке: от перегружателей до складской площадки, укладка контейнеров в штабели, работа с контейнерами в штабелях и перемещение контейнеров от штабелей на выдачу к магистральному транспорту и обратно. На рис. 1 представлена общая инфраструктура контейнерного терминала.

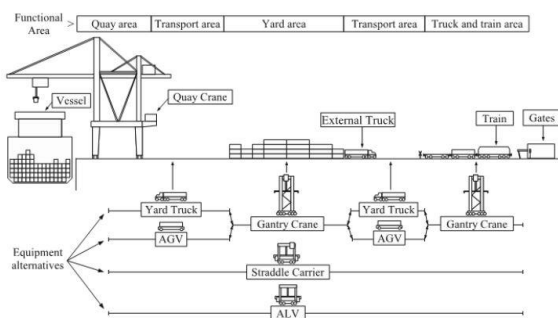


Рис. 1. Общая инфраструктура контейнерного терминала.

Для указанной инфраструктуры существует система организации транспортно-перегрузочного оборудования контейнерного терминала с козловыми кранами и автоматическими транспортными платформами или автоматическими транспортер-погрузчиками (в случае перпендикулярного расположения контейнерных блоков относительно причала).

Очевидно, что наиболее перспективным направлением развития указанных транспортных средств является разработка автономных роботизированных транспортных систем, так как автоматизация перевозки грузов на производстве способна существенно ускорить рабочий процесс, увеличить производительность труда, уменьшить количество работников. Такой автономной системе не требуется водитель или оператор, такая система способна доставлять груз без выходных и перерыва на обед 24 часа в сутки, 7 дней в неделю.

В этом варианте системы для внутритерминального перемещения контейнеров используются автоматизированные транспортные платформы (AGV) или автоматизированные транспортер-погрузчики (ALV), или Shuttle Carriers (ShCs).

Однако, говоря об указанном классе оборудования, необходимо отметить, что используется оно, как правило, не как самостоятельная транспортная единица, а в составе так называемых автоматически управляемых систем транспортных средств (Automatic Guided Vehicle Systems, AGVS, AGV-системы) [3].

Беспилотное, автоматически управляемое транспортное средство типа AGV представляет собой платформу на колесной базе, имеющее в длину 15 м и ширину 3 м. В движение такой контейнеровоз приводится с помощью дизель-

электрического малошумного двигателя. Заправка средств топливом также происходит автоматически. Перемещение платформы выполняется благодаря встроенной бортовой навигационной системе по транспондерам или электромагнитным маркерам, смонтированным в асфальт по всему периметру терминала.

Преимуществами указанного способа автоматизации контейнерных перевозок на терминале является реализация безопасных условий работы для докеров и водителей грузовиков. Благодаря компьютерному управлению, транспортные средства бесшумно, без остановок, с высокой скоростью и точностью обеспечивают доставку двадцатифутовых, сорокафутовых и даже 45-футовых контейнеров, в соответствии с полученными командами управления.

Следует отметить, что для создания подобных систем необходимы серьезные инвестиции, требуются высококвалифицированные рабочие кадры, а также возникают определенные ограничения по гибкости системы к изменениям, вызванным эксплуатационными требованиями, т.е. для изменения схемы функционирования терминала необходимы значительные капитальные затраты. Поскольку эти транспортные средства одни из самых дорогих типов AGV-систем, их использование оправдано только в случае полной автоматизации погрузочно-разгрузочных работ. Чтобы автоматизированные системы для погрузчиков эффективно обслуживали склад, требуется прокладка большого количества сложных навигационных трасс с множеством пересечений и точное позиционирование грузов на полу или стеллажах. Это обычно требует от системы управления большей сложности и точности, чем в случаях других AGV-систем, однако они выгодно отличаются большей гибкостью при необходимости объединения в общую структуру с другими подсистемами.

Сегодня в мире насчитывается около 15 различных типов AGV и более 40 производителей AGV.

Известной модификацией вышеназванного транспортного устройства является самоподъемное автоматизированное управляемое транспортное средство под названием Lift AGV (Lift Automated Guided Vehicles). Эта платформа имеет два электрических привода, позволяющих без участия человека устанавливать и снимать контейнер со своей платформы на специальный складской стеллаж. Кроме того, транспортное средство типа Lift AGV позволяет расположить сразу два двадцатифутовых контейнера независимо друг от друга и со скоростью 22 км в час доставить их от причальной стенки на контейнерную площадку [1].

Появление и использование AGV с произвольными маршрутами движения позволило обеспечить следующие преимущества:

- высокую пропускную способность терминала;
- непрерывные операции в режиме 24/7/365;
- высокий уровень безопасности,
- снижение эксплуатационных расходов (за счет стоимости рабочей силы);
- высокую точность позиционирования.

Очевидно, что использование AGV имеет большие перспективы, однако с учетом высокой цены внедрения, должно быть четко обосновано.

Другим используемым грузоперерабатывающим оборудованием является Automated Lift Vehicle (ALV), иначе называемое автоматизированным челночным перевозчиком. ALV может грузить и разгружать суда, а также перемещать грузы по контейнерному терминалу. Такая автономность позволяет сокращать как время обработки контейнера, так и общее число используемых транспортных средств на терминале [4].

Сравним возможности AGV и ALV. Для этого рассмотрим процесс разгрузки-погрузки на автоматизированном контейнерном терминале.

По прибытии судна в терминал контейнеры должны быть из него выгружены. Специальные краны, Manned Quay Cranes (QC), забирают контейнеры из трюма и с палубы в соответствии с планом разгрузки. Обычно четыре QC выполняют общую операцию выгрузки. Контейнер перегружается в автоматизированное транспортное средство (например, транспортное средство с автоматическим управлением или автоматическое подъемное транспортное средство). Эти автоматизированные управляемые транспортные средства (AGV) транспортируют контейнеры по заранее определенному пути, обычно по схеме петли, к стеку. Этот стек состоит из нескольких блоков, в которых контейнеры могут храниться определенный промежуток времени. Автоматизированные штабелирующие краны (ASCs - Automated Stacking Cranes) хранят, ставят и извлекают контейнеры в и из стека. Извлеченные контейнеры транспортируются для погрузки на средства других видов транспорта. Для загрузки же контейнеров на судно указанные процессы выполняются в обратном порядке. При выполнении этих операций AGV находится в ожидании погрузки-разгрузки контейнера краном, а ALV может перегружать контейнер с себя и на себя самостоятельно. ALV, как правило, представляет собой небольшой транспортер SC (Shuttle Carriers)[5,6].

Расход топлива (или энергии) также является важным фактором сравнительной оценки. Очевидно, что более тяжелая машина потребляет больше топлива, особенно в условиях, когда требуется много пусков и остановок, поскольку ускорение потребляет большую часть мощности. Кроме того, существует необходимость в подъеме (Lift-AGV) и подъеме (ALV), что требует дополнительной энергии. Существует возможность использовать питание машин полностью от аккумуляторной батареи, что значительно повышает энергоэффективность и приводит к реальной нулевой эмиссии при покупке экологически чистой энергии. Это также влияет на выбросы CO₂, которые в два (дизель-электрический) и в десять (аккумуляторный) раз меньше между аккумуляторным AGV и дизель-электрическим ALV. Lift-AGV находится где-то посередине, он тяжелее и должен поднимать контейнеры на стыке с краном-штабелером (ARMG). Сравнение вышеуказанных видов техники показано на таблице 1.

Таблица 1

Сравнение энергопотребления автоматических транспортеров-погрузчиков

Тип	AGV (diesel-electric/battery-electric)	Lift AGV (diesel-electric/battery-electric)	ALV (diesel-electric)
Вес	26 т / 26 т	31 т / 31 т	52 т
Расход в час	7.5 л / 17 кВт	12 л / 27 кВт	17 л
Выброс CO ₂	19.3 кг/ч / 4.9 кг/ч	30.9 кг/ч / 6.4 кг/ч	46 кг/ч
Затраты энергии на один ход	1.25 евро / 0.43 евро	1.33 евро / 0.45 евро	1.7 евро

AGV и Lift-AGV имеют связанную точку пересечения с краном, в то время как ALV имеет точку пересечения, несвязанную с краном. В большинстве случаев выполнения операций AGV должен ожидать крана. Считается, что ALV никогда не придется ждать подъемного крана, однако когда QC будет находиться в точке передачи, ALV не всегда может подойти к этой точке (это зависит от расположения точки передачи, но доступ, безусловно, ограничен). Обратная ситуация также верна: в некоторых случаях QC не может войти, поскольку ALV находится в зоне передачи. В результате и QC, и ALV потеряют динамику процесса. Кроме того, сбор и выгрузка контейнера занимает значительное время, с учетом того, что кран и AGV будут находить друг друга вслепую, а ALV должен будет искать контейнер (на практике время поиска составляет 60-120 с, в то время как крану-AGV обычно требуется на поиск 15-30 с.)

Еще одним усложняющим фактором является доступ к QC. По мере того как суда становятся шире, плотность кранов на судне увеличивается и составляет до шести-восьми кранов. Это приводит к местам (кластерам) существенного размера, где взаимный доступ ограничен. AGV имеют ширину 3 метра, а ALV- чуть более 5 метров, для проезда им требуется полоса шириной 4 метра и 7 метров, соответственно. Кроме того, ALV необходимо выровнять, прежде чем он переместится через контейнер, AGV этого не требуется, тем самым процесс не замедляется контейнерами, стоящими на земле. Движение по другим контейнерам (стоящим на перевалочных пунктах соседних кранов) представляется очень удобным, но происходит на очень низкой скорости (обычно менее 5 км/ч), блокируя доступ QC к этим перегрузочным зонам, и как следствие растет время ожидания и необходимость в очереди также и для ALV. Так как ALV не могут получить доступ к двум смежным транспортным линиям одновременно, ALV должны подбирать контейнеры индивидуально. Поскольку продолжительность двух последовательных ходов захвата превышает длительность цикла QC, то необходимо использовать как минимум четыре полосы обмена. Как видно на рисунке выше, это

становится довольно сложным, и даже невозможным, в случае больших кластеров. Напротив, с AGV параллельный доступ довольно легко реализуется, и существуют решения, реализующие обслуживание двух соседних линий передачи на QC. Характеристики кранов различных видов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики кранов, используемых при обработке контейнеров

	Battery AGV	Battery Lift-AGV	ALV
Макс скорость (Пустой)	6 м/с	6 м/с	6.6 м/с
Максимальная скорость (50 т)	6 м/с	6 м/с	5 м/с
Скорость поворота (Пустой)	3 м/с	3 м/с	2 м/с
Скорость поворота (50 т)	3 м/с	3 м/с	2 м/с
Ускорении (Пустой)	1.0 м/с ²	1.0 м/с ²	0.45 м/с ²
Ускорение (50 т)	0.5 м/с ²	0.5 м/с ²	0.38 м/с ²
Торможение (Пустой)	1.0 м/с ²	1.0 м/с ²	0.5 м/с ²
Торможение (50 т)	0.5 м/с ²	0.5 м/с ²	0.5 м/с ²

Таким образом, автоматизированные транспортер-погрузчики обладают большей маневренностью, чем порталные погрузчики, благодаря сравнительно небольшой высоте и размерам. Они эффективно применяются на терминалах, требующих значительной оперативности горизонтального перемещения контейнеров от штабелей к причальным перегружателям при соблюдении высокой плотности штабелирования. Такая система характеризуется общей высокой работоспособностью, а также высокой производительностью терминального оборудования. Кроме того, практически исключается необходимость в трудовых затратах благодаря автоматизации. Компьютерная система управления обеспечивает синхронизированные последовательности в соответствии с планом. Обеспечены движения вперед, назад и вбок. Доступна полностью автоматизированная система точной и автоматической замены батарей. Обеспечены точный контроль и запись данных (транспортные задания) с помощью программного обеспечения для управления и навигации и транспондеров, встроенных в поверхность дорожного покрытия терминала. Создано разделение процессов транспортировки и хранения. Lift AGV может использоваться для разделения контейнерных перевозок и процессов хранения контейнеров. Контейнеры автоматически помещаются или подбираются в зоне перегрузки штабелирующего крана. Автоматизация помогает оптимизировать размер автопарка с учетом повышенной загрузки. Появляется возможность повышения эко-эффективности. Свинцово-кислотные или литий-ионные аккумуляторы AGV или

Lift AGV являются альтернативой дизель-электрическим приводам и обеспечивают:

- снижение затрат на техническое обслуживание за счет упрощения трансмиссии;
- низкое энергопотребление благодаря высокоэффективным приводам с батарейным питанием;
- устранение выбросов загрязняющих веществ в терминале, низкий уровень шума;
- длительный срок службы батареи.

Для имитационного моделирования был выбран вариант характеристик AGV погрузчика, поскольку в рассматриваемом случае является наиболее предпочтительным.

Данные об указанных функциональных возможностях автоматических транспортеров-погрузчиков были использованы непосредственно при создании имитационной модели в программной среде AnyLogic, совместно с данными из соответствующей библиотеки производственных процессов.

В качестве модельного примера был выбран Первый контейнерный терминал порта Санкт-Петербурга (рис.2).

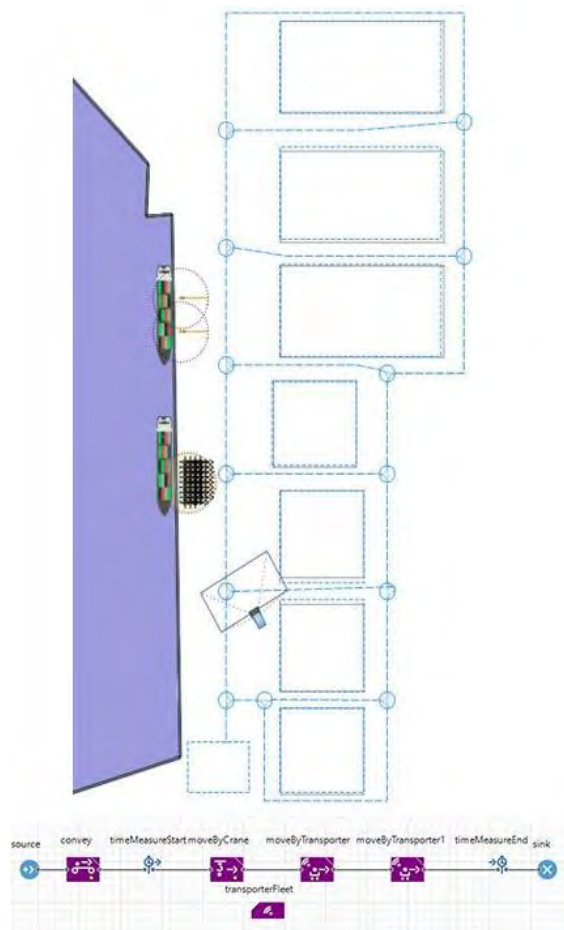


Рис. 2. Схема порта.

В ходе разработки модели был выбран показатель производительности, характеризующий количество контейнеров, разгружаемых одним краном за 1 час, с возможностью передвижения его с помощью транспортер-погрузчиков AGV. В результате проведенного моделирования

производительность составила 16 контейнеров за 1 час, что позволяет сделать вывод о возможности значительного увеличения работоспособности системы.

Полученные результаты показывают, что имитационное моделирование является эффективным способом для непрерывного проведения статистического эксперимента, главной возможностью которого является получение быстрых релевантных оценок, соответствующих цели исследования. При этом, главным критерием достоверности выполненного имитационного моделирования будет служить степень адекватности исследуемой системе, которая достигается за счет использования максимально подробных и реалистических данных, описывающих входные характеристики. [7, 8]

Заключение

При значительном увеличении объема контейнерного рынка, вопросы скорости обработки контейнеров на всех этапах становятся более актуальными. Увеличение грузооборота влечет за собой изменение во всех точках перевалки контейнеров, основными из которых являются контейнерные терминалы. Следовательно, такая тенденция порождает потребность в модернизации и переоборудовании контейнерных терминалов, в усовершенствовании складской инфраструктуры, снабжении КТ кранами-перегрузчиками с высоким уровнем производительности. От транспортно-перегрузочного и складского оборудования зависят ключевые параметры контейнерного терминала, включая мощность складских площадей, время,

затрачиваемое на обработку одного контейнера, количество обработанных контейнеров за сутки, общее количество единиц техники и персонала и т.д.

Выделяют несколько видов организации контейнерного терминала, в зависимости от используемого оборудования. Наиболее эффективным на терминалах высокой плотностью штабелирования, где необходимо оперативное горизонтальное перемещение контейнеров посредством транспорта между штабелями и причальными перегрузчиками, является использование автоматизированных транспортных платформ (AGV) или же автоматизированных транспортеров-погрузчиков (ALV).

Такая система обладает неоспоримыми преимуществами, среди которых возможность движения по произвольным маршрутам, сокращение эксплуатационных расходов за счет количества используемых единиц оборудования на терминале и автоматизации выполняемых операций. Это, в свою очередь, сокращает время обработки контейнера, повышает эффективность и скорость погрузочно-разгрузочных операций. Кроме того, переход к такой системе позволяет оптимизировать размер автопарка благодаря повышенной загрузке.

Для эффективной реализации указанных преимуществ необходимо использовать имитационное моделирование функциональных процессов контейнерного терминала, позволяющее выбрать научно обоснованный вариант развития и внедрения в практическую деятельность перспективных средств автоматизации.

Благодарности

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке госбюджетной темы 0073-2019-0004.

Литература

1. Автоматизация контейнерных перевозок [Электронный ресурс]. Корабельный портал: сайт. URL <http://korabley.net/news/avtomatizacijakontejneernykhpervezok/2012-04-23-1177> (дата обращения: 09.08.2020).
2. Кузнецов, А.А., Перспективы автоматизации контейнерных терминалов / Морские порты. - 2010.-№9(90).
3. Хлебородов, В.С., Корнилов, С.А., Анализ эффективности существующих систем организации контейнерных терминалов при использовании различного транспортно-грузового оборудования // СПТКР. - 2012. - №2. - С. 238-251.
4. Gunther, H.-O. Container Terminals and Automated Transport Systems. - Springer, 2010. -392p.
5. Saanen, Yvo. (2016). AGV versus L-AGV versus ALV: A qualitative and quantitative comparison. Port Technology International.
6. Vis, F.A. & Bakker, M. (2012). Dispatching and layout rules at an automated container terminal. Journal of Vrije Universiteit.

References

1. Automation of container shipping [Electronic resource]. The ship's portal: website. URL <http://korabley.net/news/avtomatizacijakontejneernykhpervezok/2012-04-23-1177> (accessed: 09.08.2020).
2. Kuznetsov, A. A., Prospects for automation of container terminals / Sea ports. - - 2010. - No 9(90).
3. Khleborodov, V. S., Kornilov, S. A., Analysis of the effectiveness of existing systems for organizing container terminals when using various transport and cargo equipment // SPTKR. - 2012. - NO2. - Pp. 238-251.
4. Gunter, H.-O. container terminals and automated transport systems. - Springer, 2010. - 392r.
5. Saanen, Ivo (2016). AGV vs. LOG V vs. AL: a qualitative and quantitative comparison. International Port Technology.
6. Vis, F. A. & Bakker, M. (2012). Dispatching and layout rules for an automated container terminal. Journal of the University of Brussels.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александра Сергеевна Свистунова, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru

Alexandra S. Svistunova, Junior researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru

Хасанов Дмитрий Салимович, программист, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru

Dmitry S. Khasanov, programmer, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru

УДК 621.331.5

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.024

Узкобазовая промежуточная опора вл 110 кВ из композитных материалов для подхода к перегрузочным терминалам портов

Г.А. Данилов¹, Ю.М. Денчик², Е.В. Иванова², Б.В. Палагушкин², М.Н. Романов², В.Г. Сальников², Е.Н. Солнцева²

¹Феникс-88, ²Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В работе представлена разработка промежуточной опоры для ультракомпактных ВЛ 110 кВ. Технические решения приводятся на примере реконструкции конкретного объекта – ВЛ 110 кВ. Работа выполнена в соответствии с «Техническим заданием на разработку специальных технических условий с использованием провода с защитной изоляцией для воздушных линий электропередачи на напряжение 110 кВ марки СИП-7 с целью уменьшения охранной зоны ВЛ». Выполнен анализ характеристик существующих промежуточных опор типа ПБ 110-4 и промежуточной опоры ВЛ 110 кВ с применением защищённого провода СИП-7. Выбран тип провода для проведения реконструкции линии. Осуществлён расчёт нагрузок на промежуточную опору из композитных материалов типа ПК 110-2 ПЗИ с учётом требований существующей нормативной базы, механический расчёт промежуточной композитной опоры, учитывающий различные климатические воздействия на провода и изоляторы. Предложены конструктивные элементы обеспечения заземления металлических частей опор из композитных материалов и элементы крепления самонесущих изолированных проводов к траверсам композитной опоры.

Ключевые слова: техническое задание, промежуточные опоры воздушных линий, защищённый провод СИП-7, композитные материалы, механический расчёт, расчёт нагрузок.

Composite materials made narrow base 110 kV overhead suspension tower for the port terminals approach

Gennadiy A. Danilov¹, Yullia M. Denchik², Elena V. Ivanova², Boris V. Palaguschkin², Mark N. Romanov², Vasilij G. Salnikov², Elena N. Solntseva²

¹Phoenix-88, Russian Federation, ²Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. This paper presents the development of suspension tower for ultra-compact 110 kV overhead lines. Technical solutions performed are based on example of reconstruction of 110 kV overhead line. The research aimed to reduce the security zone of overhead lines by using СИП-7 insulation type cable. The analysis of the characteristics of the existing suspension towers of the ПБ 110-4 type and 110 kV overhead line tower with the use of protected wire СИП-7 is carried out. Authors made the calculation of the loads on the suspension tower made of composite materials of the ПК 110-2 ПЗИ type, taking into account the requirements of the existing regulatory framework, they also carried out the mechanical calculation of the tower, considering various climatic effects on the wires and insulators. Structural elements of providing grounding of metal parts of tower made of composite materials and fastening elements of self-supporting insulated wires to the cross-arms of a tower are proposed.

Keywords: technical enquiry, overhead line suspension tower, protected cable СИП-7, composed materials, load calculation

Особую актуальность проектирования узкобазовых промежуточных опор ВЛ 110 кВ имеет значение для систем электроснабжения при подходе к подстанциям, расположенных в перегрузочных терминалах с большой плотностью электрической сети с высоким уровнем резервирования при необходимости компактного исполнения энергообъектов и сооружений, вследствие высокой стоимости земельных участков. Решение этой задачи, входящей в «Концепцию интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью», утверждённой ОАО «ФСК ЕЭС» 28.04.2012 г., требует новых разработок, внедрения и испытания составных элементов ультракомпактных ВЛ нового поколения для сетей 110 – 220 кВ: узкобазовых промежуточных и анкерных опор из композитных материалов, оснащения изолирующими траверсами и специальной арматурой для крепления изолированного провода соответствующего класса напряжения.

Применение изолированного провода в составе компактной ВЛ, а также изолирующих траверс и стойки опоры из композитного материала с хорошими изоляционными свойствами, позволяют спроектировать ВЛ с минимально допустимыми

расстояниями между фазами и значительно снизить охранную зону в районе прохождения ВЛ. Усиление электромагнитного поля внутри линии за счёт сближения фаз позволяет увеличить пропускную способность и улучшить электрические и технические параметры ВЛ. Ослабление магнитного поля во внешнем пространстве приводит к улучшению экологических показателей ВЛ [1-4].

Разработка промежуточной опоры для ультракомпактных ВЛ 110 кВ выполнена в ЗАО «Феникс-88», АО «Тюменьэнерго» и НП «Электросетьсервис» ОАО «ФСК» при участии специалистов из ФГБОУ ВО «СГУВТ», «НГТУ» и других организаций. Технические решения приводятся на примере реконструкции конкретного объекта – ВЛ 110 кВ в г. Сургуте. Работа выполнена в соответствии с «Техническим заданием на разработку специальных технических условий для проектирования, реконструкции «ВЛ 110 кВ Барсово-Северная, Сургут-Барсово-4 – участок от оп. №47 до оп. №57/7, отп. Сайма уч-к оп. №1-16» с использованием провода с защитной изоляцией для воздушных линий электропередачи на напряжение 110 кВ марки СИП-7 с целью.

Основные параметры реконструируемой линии приведены в техническом задании (ТЗ) на разработку:

Напряжение, кВ.....	110;
Длина трассы, км.....	5,64;
Барсово-Северная, Сургут-Северная участок от оп. №47 до оп. №57.....	1,91;
ВЛ 110 кВ Барсово-Северная, Сургут-Северная участок от оп. №57 до оп. №57/7.....	1,08;
отп. Сайма уч-к оп. №1-16.....	2,65;
Передаваемая мощность, МВт.....	45;
Количество цепей.....	2;
Наличие ВОЛС.....	есть;
Марка и сечение проводов АС 185/29, АС 150/24;	
Марка грозотроса, диаметр, мм.....	ТК-50;
Типы опор:.....	металл;
Анкерно-угловые.....	У 110-6, УС 110-8;
Промежуточные.....	ПБ 110-4;
Изоляторы.....	стеклянные;
Натяжная гирлянда.....	9хПС120;
Поддерживающая гирлянда.....	8хПС70;
Район по количеству грозовых часов в году.....	40-60;
Район по ветру.....	II;
Район по гололёду.....	II;
Район по степени загрязнённости атмосферы.....	I;

Наличие переходов через естественные и искусственные преграды

Переходы через автомобильные дороги

Для проведения расчётов, выбран по ТЗ из двух приведённых сечений проводов ВЛ (150 мм² и 185 мм²) провод изолированный (защищённый) марки СИП-7, с расчётным сечением проводящей жилы 185 мм², которое обеспечивает необходимые токовые и механические нагрузки линии.

Наружный диаметр провода D=31,8 мм, внутренний диаметр d=15,8 мм, погонная масса q=1085 кг/км. По условиям образования короны и радиопомех, диаметр токопроводящей жилы соответствует требованиям ПУЭ 7 (менее 11,4 мм).

Параметры существующих промежуточных опор ВЛ типа ПБ 110-4:

Высота железобетонной опоры.....	260000 мм;
Расположение фаз «бочкообразное», по высоте.....	3000 мм;
Опора фундамента – заглубление в грунт.....	3300 мм;
Высота нижней траверсы от земли... ..	13500 мм;
Высота гирлянды 8хПС 70.....	1016 мм;
Высота от траверсы до оси провода (с учётом сцепной арматуры).....	1425 мм;
Высота нижней фазы провода до земли.....	12075 мм.

Максимальный пролёт линии.....L=250 м.

По сравнению с опорой ПБ 110, конструкция композитной опоры с изолирующими траверсами и проводами СИП-7 позволяет уменьшить габаритный размер по вылету провода относительно оси опоры на 2,25 м (вылет траверсы ПБ 110 – 3,5 м, вылет изолирующей траверсы – 1,25 м).

Расчёт нагрузок на промежуточную опору из композитных материалов типа ПК 110-2 ПЗИ.

В соответствии с требованиями ПУЭ, расчёты выполнялись с определением удельных нагрузок на один метр пролёта.

Нормативная ветровая удельная нагрузка на провода и тросы P_w^H Н/м, действующая перпендикулярно проводу, определяется по формуле:

$$P_w^H = a_w K_1 K_w C_x W F \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где: a_w – коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролёту ВЛ, принимаемый при $p_0=500$ Па равным $a_w=0,71$; для $p_0=160$ Па равным $a_w=1$;

K_1 – коэффициент, учитывающий влияние длины пролёта на ветровую нагрузку, равный $K_1=1,0$ при $l=1,0$ м;

K_w – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности В (городская застройка), определяемый $K_w=0,85$ (по табл. 2.5.2 ПУЭ);

C_x – коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным: $C_x=1,1$ – для проводов, свободных от гололёда, диаметром 20 мм и более;

$C_x=1,2$ – для проводов, покрытых гололёдом;

W – нормативное ветровое давление, Па, в рассматриваемом режиме:

$W=W_0=500$ Па – определяется по таблицам ПУЭ в зависимости от ветрового района;

$W=W_1=1600$ Па – определяется с учётом гололёда по таблицам ПУЭ;

F – площадь продольного диаметрального сечения провода, м² (при гололёде с учётом условной толщины стенки гололёда $b_3=15$ мм);

φ – угол между направлением ветра и осью ВЛ, принимаем $\varphi=90^\circ$.

Площадь продольного диаметрального сечения провода (троса) F определяется по формуле, м²:

$$F = (d + 2K_1 K_d b_3) l \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где: d – диаметр провода, $d=31,8$ мм;

$K_1=1$ и $K_d=0,8$ – коэффициенты, учитывающие изменение толщины стенки гололёда по высоте и в зависимости от диаметра провода и определяемый по таблицам ПУЭ;

l – длина ветрового пролёта, принимаем 1,0 м.;

Площадь продольного диаметрального сечения провода (троса) F :

- без учёта гололёда

$$F = 31,8 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

- с гололёдом

$$F = (31,8 + 2 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 15) 1,0 \cdot 10^{-3} = 0,0558 \text{ м}^2.$$

Ветровая нагрузка без гололёда

$$P_w^H = 0,71 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 1,5 \cdot 500 \cdot 0,0318 \sin^2(90^\circ) = 10,6 \text{ Н/м.}$$

Ветровая нагрузка с гололёдом:

$$P_w^H = 1 \cdot 1,0 \cdot 0,85 \cdot 1,2 \cdot 1600 \cdot 0,0558 \sin^2(90^\circ) = 9,11 \text{ Н/м.}$$

Нормативная линейная гололёдная нагрузка на 1 м провода P_r^H ределяется по формуле, Н/м:

$$P_r^H = \pi K_1 K_d b_3 (d + K_1 K_d b_3) \rho g \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

где: $K_1=1$ и $K_d=0,8$ – коэффициенты, определённые по таблицам ПУЭ;

$b_3=1,5$ мм – толщина стенки гололёда;

$d=31,8$ – диаметр провода, мм;

ρ – плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см³;

g – ускорение свободного падения, принимаемое равным 9,8 м/с².

$$P_r^H = \pi \cdot 0,815 (31,8 + 1,0 \cdot 0,8 \cdot 15) 0,9 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} = 14,6 \text{ Н/м.}$$

Расчётная ветровая удельная нагрузка на провода, воспринимаемая опорами P_{w0} и P_{wT} , определяется по формуле, Н:

$$P_w = P_w^H \cdot \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f \quad (4)$$

где: P_w^H – нормативная ветровая нагрузка;

γ_{nw} , γ_p – принимаются по таблицам ПУЭ равными: $\gamma_{nw}=1,0$; $\gamma_p=1,3$;

γ_f – коэффициент надёжности по ветровой нагрузке для проводов, покрытых гололёдом и свободных от гололёда, равный $\gamma_f=1,3$;

$$P_{w0y} = 10,56 \cdot 1,3 \cdot 1,3 = 17,85 \text{ Н/м};$$

$$P_{w0} = 9,11 \cdot 1,3 \cdot 1,3 = 5,4 \text{ Н/м}.$$

Расчётная линейная гололёдная нагрузка на 1 м провода $P_{Г0}$, Н/м, воспринимаемая опорами, определяется по формуле:

$$P_{Г0} = P_{Г}^H \gamma_{n2} \gamma_p \gamma_f \gamma_d = 22,72 \text{ Н/м} \quad (5)$$

где: $P_{Г}^H$ – нормативная линейная гололёдная нагрузка, принимаемая по (3);

γ_{n2} , γ_p – принимаются согласно ПУЭ равными: $\gamma_{n2}=1,0$; $\gamma_p=1,2$;

γ_f – коэффициент надёжности по гололёдной нагрузке, принимается равным 1,3 для районов по гололёду I и II;

γ_d – коэффициент условий работы, равный 1,0.

Погонный вес провода:

$$P_{BO} = q \cdot g = 10,633 \text{ Н/м}. \quad (6)$$

Удельная нагрузка провода с гололёдом:

$$Q_{ГП} = P_{Г0} + P_{BO} = 33,35 \text{ Н/м}.$$

Усилие тяжение провода СИП-7 не должно превышать 45 Н/мм² сечения токопроводящей жилы при среднегодовой температуре (требование производителя ОАО «Севкабель» для провода СИП-7).

Максимальное тяжение провода с сечением 185 мм² (СИП-7-185) составляет:

$$P_T = 45 \cdot 185 = 8325. \quad (7)$$

Высота минимального расстояния провисшего в пролёте провода до земли в условиях городской застройки составляет 7 м. При этом стрела провеса провода в пролёте должна быть не более $f=6$ м, с учётом высоты точки подвеса нижнего провода в опоре 13 м.

Величина пролёта L определяется:

$$L = \sqrt{\frac{8f \cdot P_T}{Q_{ГП}}} = 109,5 \quad (8)$$

Габаритный пролёт композитных опор ВЛ с применением провода СИП-7 должен быть не более $L=109,5$ м, при этом максимальное тяжение провода не должно превышать $P_T=8325$ Н, или 850 кг (сил).

Расчётная весовая нагрузка на провода (гололёд и вес провода), а также провода без гололёда, воспринимаемая опорами, определится:

– весовая нагрузка на провода с гололёдом:

$$P_{Г} = Q_{ГП} \cdot L = 3652, \quad (9)$$

– весовая нагрузка на провода без гололёда:

$$P_B = P_{BO} \cdot L = 1164,3, \quad (10)$$

Максимальная ветровая нагрузка на провода без гололёда:

$$P_{w0} = P_{w0y} \cdot L = 19,55. \quad (11)$$

Ветровая нагрузка на провода с гололёдом:

$$P_{wT} = P_{w0y} \cdot L = 1686,3. \quad (12)$$

Момент изгибающий от действия ветра на траверсы:

$$M_{w0} = P_{w0} \sum (h_i) \cdot 10^{-3} = 201,3 \text{ Н·м}. \quad (13)$$

Момент учёта весовых нагрузок проводов и других элементов конструкции при деформации стойки:

$$M_{PO} = 0,25 H \cdot N \cdot P_B \cdot 10^{-3} = 47 \text{ Н·м}, \quad (14)$$

где $N=7$ – число проводов двухцепной линии и трос.

Суммарный изгибающий момент на стойку при максимальном ветре:

$$M_w = M_{w0} + M_{PO} = 248,3 \text{ Н·м}. \quad (15)$$

Момент изгибающий от действия ветра на траверсы с учётом гололёда определится:

$$M_{wT} = P_{wT} \sum (h_i) \cdot 10^{-3} = 190,6 \text{ Н·м}, \quad (16)$$

где h_i – расстояние от земли до каждого i -го провода.

Момент учёта весовых нагрузок проводов с гололёдом и других элементов конструкции при деформации стойки:

$$M_{PT} = 0,2 H \cdot N \cdot P_{Г} \cdot 10^{-3} = 118 \text{ Н·м}. \quad (17)$$

Суммарный изгибающий момент на стойку при ветре с гололёдом:

$$M_{Г} = M_{wT} + M_{PT} = 308,6 \text{ Н·м}. \quad (18)$$

Максимальный расчётный момент принимается наибольшим из двух сочетаний нагрузок и в нашем случае составляет 308,6 кН·м.

При проектировании конструкции промежуточных композитных опор для одноцепных ВЛ 110 кВ был определён и подтверждён испытаниями при номинальном механическом моменте величиной 500 кНм, который данная стойка выдерживает без повреждений и разрушений. По результатам проведённых расчётов запас механической стойкости опоры, относительно номинального момента, достаточно большой, коэффициент запаса опоры составляет 1,62.

Механическое напряжение изгиба в сечении стойки у земли составляет 945 кг/см², в то время, как предельное разрушающее напряжение стойки составляет менее 2000 кг/см².

В качестве изолирующей траверсы промежуточной опоры применён опорный полимерный изолятор типа ОТПК, изготовленный с применением стеклопластиковой трубы и наружной изоляции из кремнийорганической резины. Для крепления изолированного провода, верхний фланец изолятора выполняется из композитных материалов с клиновым зажимом (без металлических элементов – по требованию ТЗ). Изолятор жёстко крепится к стойке опоры с помощью хомута и, соответственно, должен выдерживать как эксплуатационные, так и аварийные нагрузки (обрыв провода).

Запас механической прочности изолятора определяется отношением нормированного разрушающего изгибающего момента на значение действующих изгибающих нагрузок (нормированный разрушающий изгибающий момент маркируется типом полимерного изолятора в кН). В соответствии с ПУЭ запас механической прочности изолятора при максимальных нагрузках в эксплуатационных режимах должен быть не менее 2,5. В аварийном

режиме (обрыв провода) запас прочности должен составлять не менее 1,8. По результатам ранее проведённых испытаний полимерных изоляторов типа ОТПК, допускается достаточно высокое значение нагрузок на сжатие (100 кН, не менее), поэтому действие от нагрузок на сжатие изоляторов в рассматриваемом случае не критично.

По шкале ГОСТ Р 52082 значение нормированного изгибающего момента изолятора должно превышать расчётное значение. Ближайшее к расчётному 15 кН стандартное значение – 16 кН. Таким образом, тип изолятора для изолирующей траверсы принимаем – ОТПК 16-110-2-Е УХЛ1. Буква Е обозначает модифицированный тип изолятора для специализированного применения как изолирующая траверса.

Изоляционное тело данного типа изолятора в виде стеклопластиковой трубы диаметром 110/138 мм подвергается следующим максимальным механическим изгибающим напряжениям:

при эксплуатационных нагрузках гололёдом – 29,5 МПа/301,2 кг/см²;

в аварийном режиме – 70 МПа/714,35 кг/см².

При этом нормированное разрушающее напряжение стеклопластика составляет не менее 2000 кг/см², что обеспечивает большой запас механической прочности изолирующей траверсы.

В ходе проведения расчёта, проверялись величины расстояний между проводами, на соответствие требованиям ПУЭ.

На ВЛ с поддерживающими гирляндами изоляторов при горизонтальном расположении проводов минимальное расстояние между проводами в пролёте принимаем равным 2,5 м (расчётное значение – 1,94 м).

На ВЛ с поддерживающими гирляндами изоляторов при вертикальном расположении

проводов минимальное расстояние между не отклонёнными проводами в пролёте принимаем равным 2 м (расчётное значение – 2,3 м), с учётом применения изолированного (защищённого) провода типа СИП-7.

Минимальное расстояние между грозозащитным тросом и проводами ВЛ принимается равным 6 м, что соответствует требованиям ПУЭ по углу защиты и нормированному (минимальному) расстоянию в пролёте.

В расчётах расстояний между проводами разных цепей учитывалось требование по обеспечению безопасного расстояния (1,5 м) до цепи, находящейся под напряжением, при ремонте другой цепи, с условием, что обслуживание и ремонт компактной линии будет производиться с автовышек (по согласованию с Заказчиком).

Для обеспечения требований по защите от перенапряжений, вызываемых грозовыми и коммутационными воздействиями при работе ВЛ, безопасному производству обслуживания ВЛ и её ремонта, металлические части промежуточных и анкерных опор могут быть заземлены с помощью заземляющих проводников, расположенных по центру стеклопластиковых труб стоек композитных опор. Центральное расположение заземляющих проводников внутри стоек опор выбрано из соображения максимальной компактности габаритов ВЛ.

Соединение изолированного провода ВЛ при монтаже и ремонте может осуществляться на дистанционных распорках (опорных изоляторах) анкерных опор и изолирующих траверсах промежуточных опор с помощью стандартизованных муфт с наложением изоляции и закрепления.

Литература

1. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А.Данилов, Ю.М.Денчик, М.Н.Иванов, Г.В.Ситник; под ред. В.П.Горелова, В.Г.Сальникова. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2013. – 559 с.
2. Данилов, Г.А. Ограничение импульсных напряжений в линиях электропередачи с усовершенствованными электросетевыми конструкциями: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Данилов Геннадий Александрович. – Новосибирск: ФБОУ ВПО «Новосиб. гос. акад. вод. трансп.», 2013. – 149 с.
3. Боровицкий, В.Г. Исследование причин немотивированных отключений ВЛ 110 кВ и разработка рекомендаций по снижению их числа: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Боровицкий Василий Геннадьевич. – Новосибирск: ФБОУ ВПО «Новосиб. гос. акад. вод. трансп.», 2013. – 167 с.
4. Данилов, Г.А. Разработка электросетевых конструкций на напряжение 110-220 кВ из композитных материалов / В.П.Горелов, С.В.Горелов, О.Н.Левчишин, А.А.Шемшурин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: ФБОУ ВПО «Новосиб. гос. акад. вод. трансп.», 2015. – С. 189 – 191.

References

1. Povyshenie kachestva funktsionirovaniya liniy elektroperedachi [Improving the quality of power transmission lines]. G.A.Danilov, Yu.M.Denchik, M.N.Ivanov, G.V.Sitnik; pod red. V.P.Gorelova, V.G.Sal'nikova. Novosibirsk: Novosib. gos. akad. vod. transp., 2013. 559 s.
2. Danilov, G.A. Ogranichenie impul'snykh napryazheniy v liniyakh elektroperedachi s usovershenstvovannymi elektrosetevymi konstruktsiyami [Limitation of impulse voltages in power lines with improved power grid designs]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.14.02. Danilov Gennadiy Aleksandrovich. Novosibirsk: FBOU VPO Novosib. gos. akad. vod. transp., 2013. 149 s.
3. Borovitskiy, V.G. Issledovanie prichin nemotivirovannykh otklyucheniy VL 110 kV i razrabotka rekomendatsiy po snizheniyu ikh chisla [Investigation of the causes of unmotivated outages of 110 kV overhead lines and the development of recommendations to reduce their number]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.14.02. Borovitskiy Vasiliiy Gennad'evich. Novosibirsk: FBOU VPO Novosib. gos. akad. vod. transp., 2013. 167 s.
4. Danilov, G.A. Razrabotka elektrosetevykh konstruktsiy na napryazhenie 110-220 kV iz kompozitnykh materialov [Development of 110-220 kV power grid structures made of composite materials]. V.P.Gorelov, S.V.Gorelov,

O.N.Levchishin, A.A.Shemshurin. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. Novosibirsk: FBOU VPO Novosib. gos. akad. vod. transp., 2015. S. 189-191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Геннадий Александрович Данилов, кандидат технических наук, заместитель генерального директора Закрытое акционерное общество «Феникс-88», 630088, г.Новосибирск, ул. Сибиряков-Гвардейцев 51/3, e-mail: kess@nsawt.ru

Юлия Михайловна Денчик, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Елена Васильевна Иванова, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Борис Владимирович Палагушкин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Марк Николаевич Романов, доцент кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Василий Герасимович Сальников, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Елена Николаевна Солнцева, преподаватель кафедры иностранного языка, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Gennadiy A.Danilov, Ph.D (Eng), Phoenix-88, 630088, Novosibirsk, Siberians Guardsmen-Str. 51/3, e-mail: kess@nsawt.ru

Yullia M.Denchik, Ph.D (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Elena V.Ivanova Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Boris V.Palaguschkin, Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Mark N.Romanov, Ph.D (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Vasiliiy G.Salnikov, Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Elena Nikolaevna Solntseva, Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

УДК 621.331.5

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.025

Каскадные отказы опор воздушных линий электропередач как угроза энергетической безопасности прибрежных регионов с суровым климатом

Ю.М. Денчик¹, Е.В. Иванова¹, М.Н. Иванов¹, Д.М. Иванов¹,
Б.В. Палагушкин¹, М.Н. Романов¹, В.Г. Сальников¹

¹Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В работе анализируется повреждаемость опор воздушных линий электропередач, изготовленных из традиционных материалов. Рассматриваются причины каскадных отказов опор, связанные с условиями эксплуатации, особенностями материалов. В значительной мере надёжность электросетевых конструкций обеспечиваются выбором материала и совершенством технологии изготовления конструкций из данного материала. Выделяются особые свойства композитных опор, анализируются их достоинства и недостатки применительно к прибрежным регионам с суровым климатом. Показывается, что использование композиционных материалов открывает большие возможности в строительстве, ремонте и эксплуатации воздушных линий электропередач всех классов напряжения. Применение прочных и лёгких диэлектрических опор даёт возможность не только пересматривать принципы обеспечения надёжности при механических воздействиях, но и обеспечить повышение эффективности комплексов активной и пассивной грозовой защиты. Приводится методика решения интерполяционной задачи по определению допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов воздушных линий 6-35 кВ.

Ключевые слова: каскадные отказы, опоры, воздушная линия, вероятность надёжной работы, композитные материалы, методика определения необходимого количества композитных опор.

Cascade failures of the overhead line towers as a threat to the energy security of coastal regions with severe climate

Yullia M. Denchik¹, Elena V. Ivanova¹, Michael N. Ivanov¹, Dmitriy M. Ivanov¹,
Boris V. Palaguschkin¹, Mark N. Romanov¹, Vasily G. Salnikov¹

¹Siberian State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. This paper analyzes the failure rate of overhead power transmission towers made of traditional materials. The reasons for cascade failures of supports associated with operating conditions and material features are considered. To a great extent, the reliability of power grid structures is provided by the choice of material and the perfection of the technology for manufacturing structures from this material. The authors underline the special properties of composite supports as well as their advantages and disadvantages are analyzed in relation to coastal regions with a harsh climate. It is shown that the use of composite materials opens up great opportunities in the construction, repair and operation of overhead power lines of all voltage classes. The use of strong and lightweight dielectric supports makes it possible not only to revise the principles of ensuring reliability under mechanical stress, but also to increase the efficiency of active and passive lightning protection systems. A technique for solving the interpolation problem for determining the permissible number of composite supports to prevent cascade failures of 6 - 35 kV overhead lines is given in this paper.

Keywords: cascade failures, tower, overhead line, fail-free operation probability, composite materials, method for determining the required number of composite towers.

Содержание проблемы. Воздушные линии (ВЛ) среднего напряжения являются основным видом распределения электроэнергии потребителям в прибрежных регионах с суровым климатом. Уровень повреждаемости элементов ВЛ определяется как свойствами конструкций, так и условиями их эксплуатации. По данным [1] наблюдается, примерно, следующее число отказов (на 100 км/год): опоры стальные – 0,027; опоры железобетонные – 0,028; опоры деревянные – 0,370; изоляторы – 0,180; арматура – 0,018; провода – 0,250.

Высокий уровень повреждаемости деревянных опор объясняется значительной потерей прочности вследствие загнивания деревянных опор в процессе эксплуатации и несвоевременной их заменой. Интенсивность загнивания древесины, прежде всего, зависит от качества её пропитки антисептическими составами. Наиболее быстро процесс гниения развивается при влажности древесины от 30 до 60%. Такая влажность характерна для подземной части пасынков, торцевых и горизонтально расположенных деталей опоры, а также в местах их сопряжения, то есть там, где затруднены условия высыхания влаги [2].

Зачастую опоры ломаются из-за недопустимого отклонения стоек от вертикального положения и смещения от оси ВЛ, а также от ударов молнии. Имеют место возгорания опор при касании проводом опоры и при низовых пожарах на трассе ВЛ. При прямых ударах молнии нередки расщепления и даже полные разрушения опор. На деревянных траверсах от токов утечки при загрязнении и увлажнении поверхности изоляции возникают нагрев и, в некоторых случаях, возгорание.

Основными причинами отказов железобетонных опор является развитие трещин и выкрашивание бетона, неплотная заделка в грунт, прослабление внутренних ветровых связей, коррозия арматуры (особенно в подземной части опор) и траверс. Железобетонные опоры с цилиндрическими и коническими центрифугированными стойками принципиально могут иметь достаточно высокую надёжность, механическая прочность неповреждённого бетона даже после (20-30) лет эксплуатации практически остаётся на уровне заводской марки. Однако, из-за нарушений правил транспортировки к месту установки на стойках образуются трещины. Этот вывод основан на

одинаковом характере повреждений независимо от завода-изготовителя или места прохождения трассы ВЛ [1].

Основными причинами отказов металлических опор является коррозия и старение. Ускоренная коррозия наблюдается в горизонтально расположенных элементах и в местах сопряжения элементов, где влага накапливается быстрее, а высыхание происходит медленнее. Развитие коррозии приводит к снижению несущей способности, а иногда и к поломке опор [3].

Инновационное решение в области опоростроения: многогранные гнутые стойки, заложенные в конструкциях металлических опор и фундаментов, позволяют значительно изменить технологию строительства линий электропередачи и обеспечить высокие технико-экономические характеристики ЛЭП для наиболее распространенных типов линий 6-35 кВ. Однако, они также подвержены коррозии и старению.

Состояние фундаментов опор ВЛ 6-35 кВ, расположенных на территориях в северных районах Российской Федерации, в значительной части оценивается состоянием грунта вдоль трасс линий электропередач. Наблюдается выталкивание из земной поверхности фундаментов. Эксплуатация ВЛ 6-35 кВ в этих условиях требует значительных финансовых и трудовых затрат.

У железобетонных фундаментов чаще повреждается наземная часть. Появление в ней трещин приводит к попаданию в них воды, расширению трещин при замерзании воды и последующему выкрашиванию бетона. Те же явления происходят в открытых колодцах анкерных болтов. Таким образом, основной объективной причиной повреждения железобетонных фундаментов является многократное повторение цикла «замораживание – оттаивание» влаги в бетоне [4]. Особенно это характерно для Западной и Восточной Сибири, поскольку в этих регионах в осенне-весенний период в светлое время суток температура окружающей среды выше нуля, а ночью случаются заморозки. Число неблагоприятных дней превышает 100. Для фундаментов, выполненных в виде металлических подложек, и для подземных анкерных оттяжек опор наибольшую опасность несет коррозия.

В общем старение стоек опор ВЛ и их фундаментов происходит более интенсивно, чем у других основных конструктивных элементов (проводов, изоляторов и линейной арматуры). Со временем ВЛ теряет стойкость к внешним атмосферным воздействиям. Поэтому при ураганных ветрах и непогодах наблюдается каскадный отказ опор ВЛ на проблемных участках трассы (полоса земли, на которой сооружается линия). К проблемным трассам относятся участки земли, на которых наблюдаются выталкивание фундаментов из земли, обусловленное сочетанием особенностей грунтово-почвенных свойств. По этой причине в прибрежных Северных регионах РФ высока вероятность каскадных отказов ВЛ 6-35 кВ.

Возникает угроза энергетической безопасности региона, под которой понимается совокупность условий и факторов, создающих нанесение ущерба. Поэтому, надёжность опор ВЛ 6-35 кВ в северных регионах играет важную роль в обеспечении

надёжной и экономичной работы их систем электроснабжения. Это обуславливает рассмотрения инновационных решений в области опоростроения.

Выбор направления решения проблемы. Среди наиболее важных требований, предъявляемых к электросетевым конструкциям ВЛ, работающих в регионах с суровым климатом, являются максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации и высокая надёжность. В значительной мере требования обеспечиваются выбором материала и совершенством технологии изготовления конструкций из данного материала.

Комплексу перечисленных требований больше всего удовлетворяют композитные материалы (композиты) на основе современных углеродных, борных, органических и стеклянных волокон, в сочетании с полимерными, металлическими, углеродными, керамическими и другими видами матриц [1]. Особенность композитов, как известно, в том, что они не являются материалом в классическом смысле этого слова, таким как, например, металлы, фактически это – конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. При этом композиты, выполненные из одного и того же наполнителя (волокна) и связующего по одинаковой технологии, могут иметь различные физико-механические характеристики, которые способны изменяться в широком диапазоне за счёт выбора числа направлений армирования и объёмных долей волокна в каждом направлении армирования [4].

Развитие композиционных материалов открывает широкие перспективы в строительстве, ремонте и эксплуатации воздушных линий электропередач всех классов напряжения. Применение прочных и лёгких диэлектрических опор даёт возможность не только пересматривать принципы обеспечения надёжности при механических воздействиях, но и обеспечить повышение эффективности комплексов активной и пассивной грозовой защиты. В качестве изоляционной арматуры могут использоваться траверсы консольного типа с установкой штыревого или подвесного изолятора, так и нетрадиционные решения, где в качестве изоляции выступают элементы опоры. Например, провод может быть прикреплён непосредственно к композитной стойке для ВЛ 6 – 35 кВ, что позволит существенно сократить количество отключений из-за повреждений изоляторов [1].

Композитные опоры на линиях нового поколения могут соответствовать самым высоким требованиям по надёжности, экологичности и эстетичности при высокой степени эффективности решений. Достаточно представить, что опора 6 кВ может быть перенесена и смонтирована практически вручную, а на линиях 35 кВ и выше конструкция опоры может быть использована как самостоятельный изолятор, иметь непосредственное крепление проводов, может быть лишена заземляющего устройства. Немаловажно, что композитные изоляционные опоры могут рассматриваться в качестве аварийно-восстановительного резерва для ВЛ всех классов напряжения.

Композитные изолирующие опоры могут решить проблемы быстрых восстановительных ремонтов на ВЛ всех классов напряжения. Линии среднего напряжения подвержены частым авариям,

связанным с опорами. Падение опор на линиях 6 - 35 кВ, как правило, имеет массовый характер. Ремонт ВЛ 6 – 35 кВ с упавшими опорами требует немалых трудозатрат. Решения могут быть как традиционными, так и радикальными. Опора может быть, как «опора», а может быть «изолирующей подставкой» под провод. К несомненным преимуществам композитных опор можно отнести [4]:

- высокую удельную прочность;
- отсутствие металлических частей – вся опора и траверса – диэлектрик, вследствие этого – высокая безопасность и отсутствие необходимости заземления;

- высокая коррозионная стойкость, стойкость к циклам замораживания и размораживания, вследствие этого – отсутствие необходимости в окраске опор в эксплуатации;

- модульно-секционная конструкция, вследствие этого – возможность ручной транспортировки секций, компактная укладка в транспорт;

- в силу гибкости конструкции композитные опоры эффективно воспринимают ударные нагрузки, возникающие при пляске проводов, сбросе гололёда, коротких замыканиях, сейсмических событиях.

Указанные преимущества обеспечивают:

- возможность транспортировки и монтажа в труднодоступных местах без использования спецтехники;

- высокую скорость монтажа;

- сокращение затрат на транспортировку, особенно на дальние расстояния или в труднопроходимой местности;

- возможность вездеходной доставки;

- возможность применения в сложных климатических условиях;

- меньшие требования к изоляции и расстоянию от провода до опоры (траверсы);

- сохранение устойчивости опор после аварийных нагрузок (падение деревьев, сброс гололёда, короткие замыкания);

- продолжение работы линии даже при многочисленных пробоях или разрушения изоляторов;

- возможность безопасного совмещения цепей различных классов напряжений;

- возможность прокладки ВЛ в стеснённых условиях [2].

Однако, с позиции постановки нашей задачи одним из важнейших преимуществ композитных опор является сохранение упругости при больших прогибах, вследствие этого высокую устойчивость к аварийным нагрузкам. Здесь уместно указать на аналогию с игрушкой «Ванька-встанька».

Несмотря на указанные преимущества эта опора не соответствует основному требованию к ВЛ по экономически приемлемой стоимости.

Композитные опоры на порядок и более больше стоимости типовых опор. В связи с этим возникает потребность в частичном применении композитных опор (на проблемных трассах).

Определение допустимого количества композитных опор на проблемной трассе для предотвращения каскадных отказов ВЛ 6-35 кВ. Необходимо решить интерполяционную задачу теории планирования эксперимента по предсказанию допустимого количества композитных опор на 1 км ВЛ 6-35 кВ. Решение этой задачи

состоит в построении интерполяционной модели (формулы). В качестве параметра оптимизации представляется допустимое эксплуатацией качество функционирования сетей (ГОСТ Р 50397 – 93), представленного в нашей задаче вероятностью безотказной работы ВЛ 6-35 кВ. Измерение этого параметра невозможно, поэтому воспользуемся ранговой оценкой.

Ранг – это оценка параметра оптимизации по заранее выбранной шкале: двухбальной, пятибальной и т.д.

Ранговый параметр имеет ограниченную дискретную область определения [4]. В нашей задаче эта область содержит два значения: да – нет. Утвердительное «да» означает, что количество x опор обеспечивает необходимое качество эксплуатации ВЛ 6-35 кВ. Отрицательное «нет» – режим сети не отвечает требованиям эксплуатации. Конечно, ранговая оценка носит субъективный характер.

Пусть по экспертным оценкам дискретная область рангового параметра ограничивается величиной, представляющей 20% от стоимости ВЛ длиной 1 км на стандартных опорах, т.е. стоимость композитных опор в этой ЛЭП не должна превышать данной суммы. При превышении этой величины возможны заметные влияния на себестоимость перевозки грузов и на риски в области энергетической безопасности, связанные с проблемами эксплуатации транспортных магистралей, находящихся в удалённых местностях [1]. Риски возрастают при увеличении себестоимости перевозимой продукции.

Параметр оптимизации является технико-экономическим. Итоговая (Ц) стоимость строительства 1 км ВЛ определяется в Р (рубли) стоимостью свайных оснований (фундаментов) (С) и стоимостью опор, монтажных работ всех видов и материалов, используемых при этом (b) и представляется математической моделью

$$Ц = \psi(C, b). \quad (1)$$

На рис. 1 представлена функциональная схема зависимости параметра оптимизации от влияющих факторов.



Рис. 1 – Функциональная схема воздействия влияющих факторов на параметр оптимизации $Ц = \psi(x, H)$

Количество композитных опор на ВЛ 6-35 кВ длиной 1 км (фактор x) является аргументом функции конструктивных размеров

$$q = \varphi\left(\frac{x}{N}\right). \quad (2)$$

где N – количество всех опор на данной трассе, ед.

В целом конструктивная часть ВЛ характеризуется типом опор, длинами пролётов, габаритными размерами, конструкцией фаз, количеством изоляторов.

Таким образом, определены области определения величины x в зависимости от величины напряжения. Например, для ВЛ 6 – 10 кВ фактор x находится в пределах

$$0 < x \leq (13...20). \quad (3)$$

Фактор N – число отказов ВЛ на трассе длиной 1 км, представляется функцией

$$N = \chi(K_{1(0)}, K_2, K_3), \quad (4)$$

где $K_{1(0)}$ – показатель надёжности питания приёмников электроэнергии 1 категории и особой группы; K_2 – 2-й категории; K_3 – 3-й категории согласно ПУЭ [5].

Функция N показывает, что ВЛ, питающая электроприёмники 1-й и особой групп, а также 2-й группы, не должны иметь отказов. Но так не бывает, поэтому при определении области изменения этого фактора будем исходить от достигнутого. Среднее число отказов за год ВЛ 6-35 кВ на 100 км составляет $N_1 = 7$, которое не удовлетворяет эксплуатации [4]. Следовательно, желаемое число отказов на 100 км трассы $N_{ж}$ должно находиться в пределах

$$0 \leq N_{ж} \leq N_1. \quad (5)$$

Приведённые характеристики параметра оптимизации и влияющих факторов соответствуют требованиям теории планирования эксперимента в части интерполяционной задачи [4]. Это позволяет представить интерполяционную функцию в виде

$$Ц = \psi(C, b) = \psi\left[q = \varphi\left(\frac{x}{N}\right); \chi(K_{1(0)}, K_2, K_3)\right]. \quad (6)$$

Областью применения этой формулы являются проблемные трассы ВЛ 6-35 кВ, на которых могут происходить каскадные отказы. Косвенным признаком этих трасс является проектная величина C (1), когда она является значительной (сравнимой с величиной b). Задача имеет единственное решение при принятых условиях и ограничениях.

Решение уравнения (6) рассмотрим применительно к электрическим сетям 6 кВ (рис. 2) Западно-Сибирского регионального управления ООО «Лукойл-Электросети». При этом учитываются следующие допущения и ограничения:

- ранговый параметр не превышает 20% стоимости проблемной трассы 6 кВ длиной 1 км на типовых опорах;

- расчётное количество опор на трассе ВЛ 6 кВ длиной 1 км соответствует допустимому значению 13-20;

- желаемое число отказов $N_{ж}$ ВЛ 6 кВ составляет $N_{ж} \leq N_1$;

- композитная опора не менее чем в 5 и более раз дороже типовой, но значительно надёжней – при замене всех типовых опор на трассе композитными отказы прекращаются даже в условиях сурового климата;

- используется линейная зависимость между отказами ВЛ и количеством композитных опор, чем больше $x \leq 13-20$, тем меньше величина отказов $N_{ж} \leq 7$.

При заданных условиях методом математического анализа получена следующая интерполяционная модель линейной функции вида [4]

$$N_{ж} = -Vx + 7, \quad (7)$$

где V – коэффициент, зависящий от количества опор на 1 км трассы, $V = f(N)$.

Функция $N_{ж} = \varphi(x)$ является монотонно убывающей, что соответствует физическому смыслу решения задачи, является математической моделью целей рациональных функций (2) и (4).

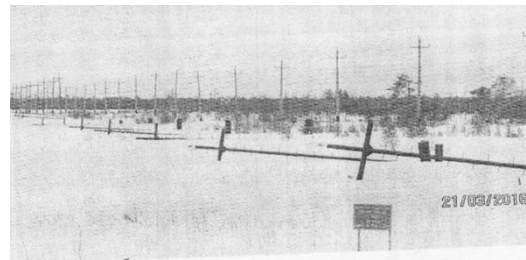


Рис. 2 – Разрушенная ВЛ 6 кВ в результате сил, выталкивающих фундаменты из земли и ураганного ветра (передний план) и построенная взамен линия электропередач (задний план)

Полученные таким образом интерполяционные модели монотонно убывающих функций $N_{ж} = \varphi(x)$ при различных значениях $x \leq N$ при $N_1 = 7$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Математические модели целей рациональных функций зависимости числа отказов от количества композитных опор на трассе ВЛ 6 кВ

N, штук	Интерполяционная модель монотонно убывающей функции $N_{ж} = \varphi(x)$ при значениях $x \leq N$ при $N_1 = 7$	Абсолютная ошибка расчёта ΔN , отказы
13	$N_{ж} = -0,54x + 7$	-0,06
14	$N_{ж} = -0,5x + 7$	0
15	$N_{ж} = -0,46x + 7$	-0,06
16	$N_{ж} = -0,43x + 7$	-0,02
17	$N_{ж} = -0,41x + 7$	-0,1
18	$N_{ж} = -0,38x + 7$	-0,2
19	$N_{ж} = -0,36x + 7$	-0,24
20	$N_{ж} = -0,35x + 7$	-0,1

Абсолютные ошибки расчётов не превышают - 0,25, то есть меньше 1 (целого числа отказов), что удовлетворяет условию решения задачи.

На рис. 3 представлены графики линейных функций $N_{ж} = \varphi(x)$ при $N = 13$ (1) и $N = 20$ (2), а также область определения этих функций при изменении числа опор на 1 км в пределах $13 \leq N \leq 20$.

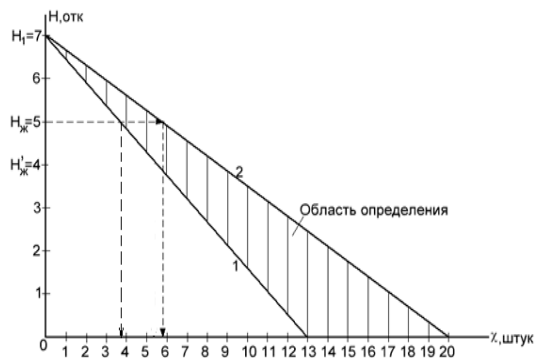


Рис. 3 – График линейных функций $N_{ж}=\varphi(x)$ при $N=13$ (1) и $N=20$ (2) и область определения этих функций при $13 \leq N \leq 20$.

Анализируя этот график отметим, что при желании снизить число отказов с 7 на 100 км (общепринятая величина для ВЛ 6-35 кВ) до $N_{ж}=5$ необходимо на трассе длиной 1 км установить 6 композитных опор при общем количестве опор $N=20$ и только 4 опоры при $N=13$.

Таким образом, представленная методика решения интерполяционной задачи по определению допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов ВЛ 6-35 кВ является по существу откликом на директивный документ [3], направленный на уменьшение угроз энергетической безопасности, и позволяет наиболее эффективно использовать экономические возможности электросетевых компаний для повышения устойчивости электрических сетей при обстоятельствах (форс-мажор), которые невозможно предотвратить или устранить.

Литература

- 1 Литвак В.В. Обследование высоковольтных электрических сетей Сибири [Текст]/В.В.Литвак, Е.П.Богданов // Науч.пробл.трансп.Сиб и Дал.Вост. – 2013. - №1. – С.308-310.
- 2 Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии [Текст]/ А.А.Герасименко, В.Т.Федин. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.
- 3 Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации, утверждена Указом Президента РФ от 13.05.2019, №216..
- 4 Романов М.Н. Методика решения интерполяционной задачи по определению допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов воздушных линий 6-35 кВ/М.Н.Романов, А.И.Антонов, Ю.М.Денчик, Д.А.Зубанов, Е.В.Иванова, Д.М.Иванов, М.Н.Иванов, А.А.Руппель, В.Г.Сальников// Свидетельство о регистрации электронного ресурса №24297 от 6.11.2019. – М.:ОФЭРНИО, 2019.
- 5 Правила устройства электроустановок. – М.: Изд-во «ДЕАН», 2001. – 928 с.

References

1. Litvak V.V. Obsledovanie vysokovol'tnykh elektricheskikh setey Sibiri [Inspection of high-voltage electrical networks in Siberia]. V.V.Litvak, E.P.Bogdanov. Nauch.probl.transp.Sib i Dal.Vost. 2013. No.1. S.308-310.
2. Gerasimenko A.A. Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii [Electricity transmission and distribution]. A.A.Gerasimenko, V.T.Fedin. Rostov n/D: Feniks, 2008. 715 s.
3. Doktrina energeticheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii [Energy security doctrine of the Russian Federation], utverzhdena Ukazom Prezidenta RF ot 13.05.2019, No.216.
4. Romanov M.N. Metodika resheniya interpol'yatsionnoy zadachi po opredeleniyu dopustimogo kolichestva kompozitnykh opor dlya predotvrashcheniya kaskadnykh otkazov vozdushnykh liniy 6-35 kV [Methodology for solving the interpolation problem for determining the permissible number of composite supports to prevent cascade failures of 6-35 kV overhead lines]. M.N.Romanov, A.I.Antonov, Yu.M.Denchik, D.A.Zubanov, E.V.Ivanova, D.M.Ivanov, M.N.Ivanov, A.A.Ruppel', V.G.Sal'nikov. Svidetel'stvo o registratsii elektronno go resursa No.24297 ot 6.11.2019. M.:OFERNIO, 2019.
5. Pravila ustroystva elektroustanovok [Electrical installation rules]. M.: Izd-vo «DEAN», 2001. 928 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юлия Михайловна Денчик, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Yullia M. Denchik, Ph.D (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Елена Васильевна Иванова, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Elena V. Ivanova, Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Михаил Николаевич Иванов, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта,

Michael N. Ivanov, Ph.D (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Дмитрий Михайлович Иванов, аспирант кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Борис Владимирович Палагушкин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Марк Николаевич Романов, доцент кафедры электрооборудования и автоматики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Василий Герасимович Сальников, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетических систем, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г.Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Dmitriy M. Ivanov, graduate student Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Boris V. Palaguschkin, Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Mark N. Romanov, Ph.D (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

Vasiliy G. Salnikov, Dr. Sci. (Eng), Siberian State University of Water Transport 630099, Novosibirsk, Shchetinkin Str. 33, e-mail: kess@nsawt.ru

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.94+681.51

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.026

Оценка техногенной опасности транспортировки нефти от необорудованного морского побережья в танкеры по гибким трубопроводам рукавного типа

А.С. Поляков¹, А.А. Таранцев^{1,2}, Д.Ф. Кожевин¹, В.Ю. Каминский²¹Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, ²Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук

Аннотация. Выполнен анализ надежности технологического оборудования в составе гибкого трубопровода рукавного типа, а также проанализированы условия его функционирования в системе передачи нефти с необорудованного морского побережья в танкеры. Характеристики надежности оборудования выражаются через интенсивность отказов и длительность цикла транспортировки нефти. Количественным показателем надежности рассматриваемой системы принят технический риск. При частоте негативных событий от 10^{-2} до 10^{-4} в год риск считается маловероятным, но может сопровождаться серьезными последствиями – в пределе – катастрофическими. Более точную оценку риска выполнить невозможно из-за неопределенности информации о временном цикле и характере реальных нагрузок на элементы системы. Проведена оценка воздействия поражающих факторов при авариях временных трубопроводов рукавного типа, развертываемых на необорудованном морском побережье. Выполнен прогноз величин потенциального и индивидуального пожарных рисков. Приведено обоснование их допустимого увеличения в соответствии с требованиями Федерального закона «О пожарной безопасности».

Ключевые слова: побережье, Арктика, нефть, гибкий трубопровод, танкер, сценарий, дерево событий, пожарный риск.

Assessment of the man-induced hazard in transporting oil from the unequipped sea coast to tankers via flexible hose pipelines

Alexandr S. Polyakov¹, Alexandr A. Tarantsev^{1,2}, Dmitriy F. Kozhevnikov¹, Valery Yu. Kaminsky²¹St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, ²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The reliability analysis of process equipment as part of a flexible hose-type pipeline has been carried out, and the conditions of its functioning in the system of transferring oil from the unequipped sea coast to tankers have been analyzed. Equipment reliability characteristics are expressed in terms of the failure rate and duration of the oil transportation cycle. The technical risk is taken as a quantitative indicator of the reliability of the system in question. With a frequency of negative events of 10^{-2} to 10^{-4} per year, the risk is considered unlikely, but can be accompanied by serious consequences - in the limit - catastrophic ones. A more accurate risk assessment cannot be performed due to the uncertainty of information about the time cycle and the nature of the real loads on the system elements. The assessment of an impact of damaging factors in accidents with temporary hose-type pipelines deployed on an unequipped sea coast has been performed. The forecast of values of potential and individual fire risks has been made. The substantiation of their permissible increase in accordance with the requirements of the Federal Law "On Fire Safety" is given.

Key words: coast, Arctic, oil, flexible hose-type pipeline, tanker, scenario, event tree, fire risk.

Введение

Необходимость подачи нефти и нефтепродуктов с необорудованного побережья в танкеры по гибким трубопроводам рукавного типа (ГТРП) носит временный характер и возникает, как правило, при экстремальных обстоятельствах. Актуальность данной проблемы обусловлена освоением нефтегазовых месторождений в Арктике и решением задач на побережье Северного Ледовитого океана [1].

Первоначально системы передачи нефтепродуктов с необорудованного побережья применяли для заправки военных кораблей на рейде [2-4]. Накопленный опыт был реализован в условиях Арктики, когда по временному рукавному сворачиваемому трубопроводу перекачивали нефть в танкеры (мыс Каменный, 2014-2016 г.г.).

При транспортировке нефти задействованы определённые технические объекты (вместе с

работающим на них персоналом), а именно: склад (приемо-сдаточный пункт) нефти и нефтепродуктов на берегу, гибкий трубопровод рукавного типа (ГТРП) в акватории и принимающий танкер. Перечисленные объекты подлежат обязательной защите от взрывов и пожаров техногенного характера [5, 6].

В общем случае техногенная безопасность работ при перекачке нефти включает промышленную, пожарную и экологическую компоненты. Экологическая безопасность определяется первыми двумя компонентами и отдельно не рассматривается. Тем более, что тушение возможного пожара и проведение спасательных работ обеспечивают мероприятия, предусмотренные в планах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов при перевалке нефти на акватории с участием соответствующих профильных спасательных подразделений [7,8].

Вопросы прогнозной оценки негативного воздействия техногенных опасных факторов на

характер функционирования рукавных трубопроводов в экстремальных условиях освещены недостаточно полно.

Целью настоящего исследования является прогнозирование степени техногенной безопасности при передаче нефти с необорудованного побережья в танкеры по временному гибкому трубопроводу рукавного типа.

1. Состав оборудования

В качестве объектов сравнения приняты характеристики гибких трубопроводов ВМФ России и плоского сворачиваемого временного трубопровода, действовавшего на мысе Каменный.

Указанные трубопроводы имеют следующие характеристики [3,4,9-11]:

- общая протяженность рукавной линии - 600-800 м; линия собрана из отдельных секций длиной по 200м (условный диаметр - 150мм), имеет соответствующие сертификаты и разрешения государственных надзорных органов на применение;

- каждая 200м рукавная секция рассчитана на рабочее давление - 1,0 МПа, испытательное давление - 1,5 МПа. Их механическая прочность (класс K42) отвечает требованиям, предъявляемым к

стальным сварным трубам магистральных нефтепроводов отечественного производства;

- длительность перегрузочного цикла включает время загрузки (10-12ч) одного речного танкера типа «Лена-нефть» (грузоподъемность до 3 000т) и время ожидания подачи под загрузку аналогичного танкера (5-7ч). Далее нефть перегружают на рейде в морские танкеры (грузоподъемность 30 000 т), идущие в порт назначения. За сезонную навигацию (около 3-х месяцев) по временному рукавному трубопроводу осуществляется до 30 циклов загрузки, что соответствует загрузке 7-8 танкеров речного водоизмещения в месяц [11, 12];

- технология перекачки нефти по плоским сворачиваемым рукавам в условиях необорудованного морского побережья хорошо известна и освоена на комплектах беспричастной заправки кораблей [2 - 4]. Отметим, что рукавная линия заканчивается быстросрабатывающими клапанами, исключающими пролив нефти при экстренном отсоединении от танкера.

Следует отметить, что надежность элементов трубопроводной системы поставщики характеризуют трудно сопоставимыми величинами (табл.1).

Таблица 1

Показатели надежности элементов системы

Элементы системы	Показатели надежности и их значения по данным поставщиков продукции	Приведенная интенсивность отказов (λ , ч ⁻¹) к длительности цикла (10 ч)
Насос центробежный: подача - от 200 до 300 м ³ /ч, давление - до 16 кгс/см ²	Средний ресурс, не менее – 5000 ч; Средний срок службы, не менее - 9 лет. Средняя наработка на отказ, не менее - 3200 ч	$\lambda = 3,13 \cdot 10^{-4}$
Шаровый кран DN 150 Ру 16 кгс/см ²	Средний срок службы - 30 лет, полный средний ресурс - 8000 циклов. Нарботка на отказ - 4000 циклов. Время срабатывания – 40 с.	$\lambda = 0,25 \cdot 10^{-4}$
Электропривод шарового крана	Интенсивность отказов - один сбой в работе за 10 лет ($\lambda \geq 10^{-2} \dots 10^{-1}$ год ⁻¹). Время срабатывания – 40 с.	$\lambda = 0,12 \cdot 10^{-4}$
Плоский сворачиваемый рукав	Срок службы - 10 лет; назначенный ресурс - 3000 циклов (включая монтаж, работу по назначению и демонтаж)	$\lambda = 0,33 \cdot 10^{-4}$

При анализе риска аварии и связанной с ней угрозы считаем, что временный трубопровод является технологической системой, состоящей из основных технических устройств согласно табл.1.

Основными количественными показателями оценки надежности рассматриваемой системы принимаем технический и индивидуальный риски [12,13].

2. Оценка и прогнозирование техногенной безопасности передачи нефти

Оценка и прогнозирование техногенной опасности передачи нефти в танкеры по величине технического риска выполнены на основе национальных стандартов надежности [14 - 16]. При этом учтены общие технические требования к трубопроводам из гибких плоскостворачиваемых

рукавов, предназначенных для временной транспортировки нефти и иных продуктов по магистральным трубопроводам [11], введенные в действие с 01.08.2020г.

Временный рукавный трубопровод, с позиций теории надежности, представляет собой последовательно соединенные структурные элементы без резервирования. Определяющим показателем объекта считают свойство безотказности, учитывающее нестационарный характер эксплуатации на одном месте (в календарном исчислении от нескольких суток до нескольких месяцев) и цикличность режима использования (на одну или несколько операций заполнения танкера). В этом случае безотказность принято характеризовать наработкой на отказ (T , ч) и интенсивностью отказов системы (λ , ч⁻¹) за время её непрерывной работы.

Поскольку надежность элементов трубопроводной системы, как уже отмечалось, выражается трудно сопоставимыми величинами, (табл.1), они приведены к одному виду – расчетной интенсивности отказов, измеряемой количеством отказов в единицу времени ($ч^{-1}$). Это можно сделать только на основе величины наработки на отказ рукавного трубопровода. Она может составить в рассматриваемом случае: $T \geq 20ч$ (один загрузочный цикл), или $T \geq 160ч$ (за месяц загрузки) или $T \geq 640ч$ (за навигационный сезон), в зависимости от возможностей и характеристик речного танкерного флота.

Данное утверждение хорошо согласуется с [15], где надежность выражают назначенным сроком службы (10 лет) и назначенным ресурсом (не менее 3000 циклов). При этом цикл гибких плоскостворачиваемых рукавов включает монтаж, работу по перекачке рабочей среды и демонтаж трубопровода.

Конструкция гибких плоскостворачиваемых рукавов, наряду с другими требованиями, должна выдерживать количество изгибов материала рукава на 180° не менее 100 раз при температуре минус $(60 \pm 2)^\circ C$.

С учетом этого положения выполнен пересчет общего количества циклов элементов ГТРТ к наработке на отказ в часах. Таким образом, назначенный ресурс (не менее 3000 циклов) следует считать эквивалентным, примерно, 1000 ч наработки системы (100 циклов развертывания, продолжительностью по 10-12 ч каждый).

Климатические условия Арктики требуют максимального ограничения участия человека в работе технических устройств, поэтому следует ориентироваться на величину наработки на отказ $T \geq 640ч$. Существует также консервативное мнение [10], что минимальное значение наработки на отказ - $T_{min} \geq 1000 ч$. Такой величине наработки соответствует суммарная интенсивность отказов всей системы - $\lambda_{max} = 0,001 ч^{-1}$.

Поскольку рукавный трубопровод может состоять из четырёх последовательно соединенных секций (протяженностью по 200 м каждая), интенсивность отказов одной секции должна быть меньше в 4 раза, т.е. не более $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-4} ч^{-1}$. Из табл.1 видно, что

плоский сворачиваемый рукав обладает наибольшей интенсивностью отказов. Рукав - основной элемент ГТРТ, отказ которого ведет к авариям в акватории. Выполним расчеты для этого участка трубопроводной линии.

Согласно [14, п.6.3.2], при частоте реализации от 10^{-2} до 10^{-4} в год, событие, считающееся маловероятным, может сопровождаться серьезными последствиями (незначительного и катастрофического характера). Более точную оценку дать невозможно из-за неопределенности сведений о временном цикле и характере реальных нагрузок на элементы системы.

В технической документации на ГТРТ изготовитель должен указывать перечень отказов и критерии предельного состояния, которые, как следует из [14, п.6, рис.4, рис. А.3], формулируются на основе анализа риска, связанного со спецификой объекта.

Оценка и прогнозирование техногенной опасности по величине индивидуального риска проводится для наиболее тяжёлых условий. Согласно методике [13] наиболее значимыми факторами риска аварии являются ударная волна от взрыва и тепловое воздействие последующего пожара нефти, вытекшей из разрушенного технологического трубопровода.

Ниже приводится анализ последствий аварий от ударной волны и теплового воздействия пожара нефти из разрушенного трубопровода.

Из данных табл.1 видно, что интенсивность отказов электроприводов шаровых кранов (автоматики) значительно превышает $10^{-6} год^{-1}$, поэтому, в соответствии с [13, приложение II, п.6, п.п.«в»], время их срабатывания (при отсутствии резервирования элементов) увеличивается до 120 секунд.

Определим величину потенциального риска аварийной ситуации, связанной с разгерметизацией ГТРТ.

По методике [13] рассчитан массовый расход из ГТРТ (при различных диаметрах аварийного отверстия) и определена масса вышедшего в результате аварии продукта, с учетом времени срабатывания задвижек (табл.2).

Таблица 2

Значения величин расхода и массы вышедшего продукта при аварийной ситуации

Диаметр аварийного отверстия, мм	Массовый расход, кг/с [13]	Масса вышедшего продукта, кг [13]	Диапазон массового расхода истечения для определения условной вероятности сценария [13, табл.П2.1]
12,5	4,107	12860	Средний (1-50 кг/с)
25	16,428	14340	Средний (1-50 кг/с)
50	65,7	20260	Большой (>50 кг/с)
100	66,66	24000	Большой (>50 кг/с)
150	66,66	24000	Полный разрыв

3. Сценарии возникновения пожароопасных аварийных ситуаций и возгорания

Основные сценарии возникновения пожароопасных аварийных ситуаций и пожаров, в результате разгерметизации ГТРТ, связаны с воздействием теплового потока при пожаре пролива и избыточного давления взрыва при сгорании паровоздушного облака.

Рассмотрена реализация пятнадцати возможных сценариев пожаров с помощью деревьев событий с указанием частоты реализации каждого сценария.

Условная вероятность события определена, в соответствии с [13, табл. П.21], как для двухфазной смеси (температура вспышки продукта менее $28^\circ C$).

Частоты реализации сценариев при разгерметизации трубопровода рассчитаны как произведение частоты возникновения

инициирующего пожароопасную ситуацию события (по дереву события для каждого сценария) на частоту утечек из технологического оборудования при определенном диаметре аварийного отверстия и с учетом длины ГТРТ - 800 м [17-19].

Примеры развития отдельных характерных аварийных ситуаций отражены на рис. **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**-3.

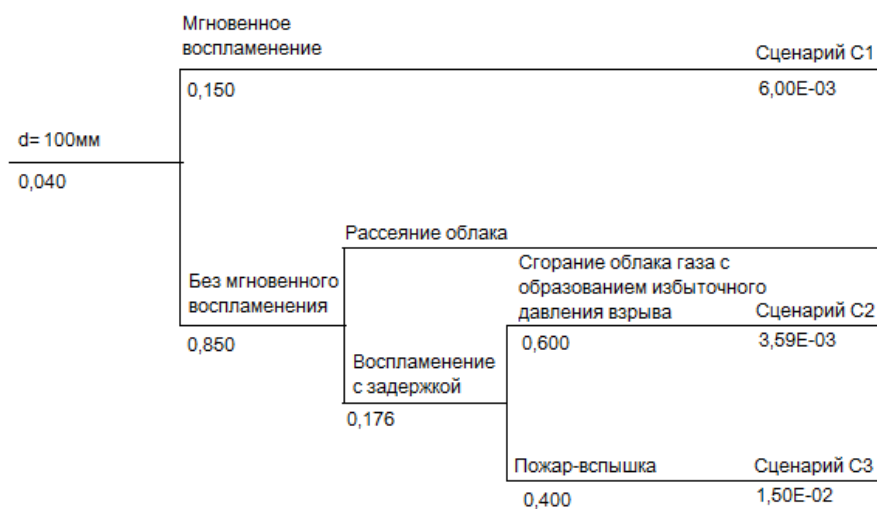


Рис. 1. Частичная разгерметизация трубопровода (через отверстие диаметром 100 мм)

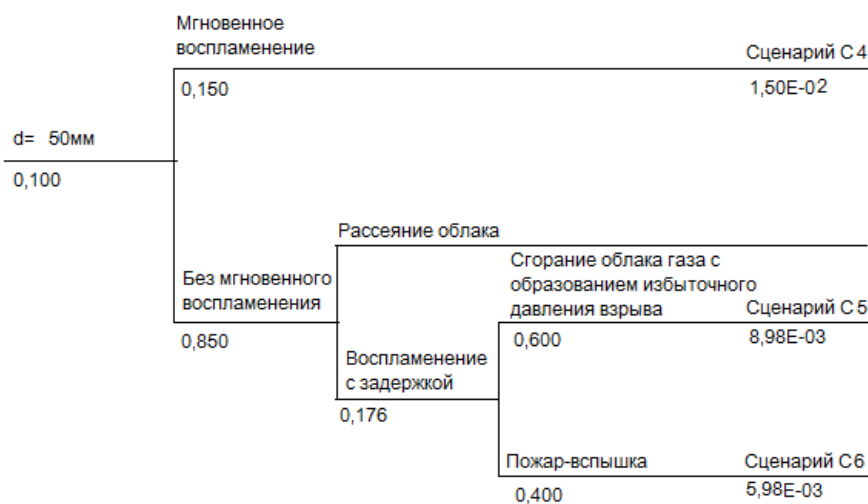


Рис. 2. Частичная разгерметизация трубопровода (через отверстие диаметром 50 мм)

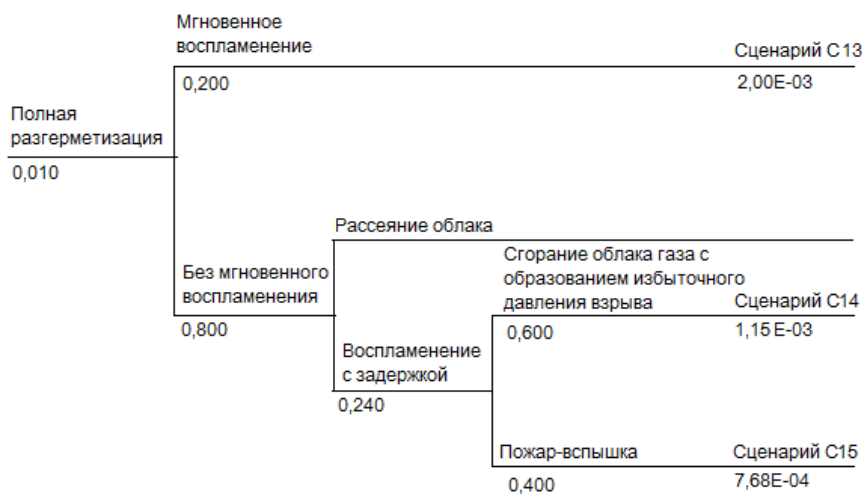


Рис. 3. Полная разгерметизация трубопровода

Таблица 3

Частота реализации рассмотренных сценариев

Сценарий	Частота утечек из технологического оборудования, м ⁻¹ ·год ⁻¹	Условная вероятность возникновения событий, инициирующих пожароопасную ситуацию	Частота реализации рассмотренных сценариев, год ⁻¹
№1	1.30E-07	6.00E-03	6.24E-07
№2	1.30E-07	3.59E-03	3.73E-07
№3	1.30E-07	2.40E-03	2.50E-07
№4	3.10E-07	1.50E-02	3.72E-06
№5	3.10E-07	8.98E-03	2.23E-06
№6	3.10E-07	5.98E-03	1.48E-06
№7	7.90E-07	8.75E-03	5.53E-06
№8	7.90E-07	2.08E-03	1.31E-06
№9	7.90E-07	6.60E-03	4.17E-06
№10	1.90E-06	2.10E-02	3.19E-05
№11	1.90E-06	5.00E-03	7.60E-06
№12	1.90E-06	1.58E-02	2.40E-05
№13	2.50E-08	2.00E-03	4.00E-08
№14	2.50E-08	1.15E-03	2.30E-08
№15	2.50E-08	7.68E-04	1.54E-08

Вероятные зоны поражения определялись по методике [13, Приложение 1]. Получено, что условная вероятность поражения людей на танкере и на складе при реализации каждого сценария равна единице.

Величина потенциального пожарного риска $R(a)$ (год⁻¹) в акватории определена согласно [13, формула 1], как суммарная величина потенциального риска для всех сценариев, и составляет:

$$P_{\text{склад}} = P_{\text{танкер}} = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Величина индивидуального пожарного риска - R_m (год⁻¹) для m -го работника при его нахождении на территории объекта определялась по [13, формула 9].

Суммарная годовая доля времени нахождения каждого сотрудника склада на рабочем месте (с учетом 40-часовой рабочей недели и отпуска 30 календарных дней) составляет 22%.

$$g_{\text{склад}} = 0,22.$$

Суммарная годовая доля времени нахождения каждого из сотрудников на танкере при загрузке (с учетом 19-часовой загрузки танкера и периодичности загрузки раз в месяц) составляет 2,6%.

$$g_{\text{танкер}} = 0,026.$$

$$R_{\text{танкер}} = P_{\text{танкер}} \cdot g_{\text{танкер}} = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 0,026 = 2,16 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1} = 0,022 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$R_{\text{склад}} = P_{\text{склад}} \cdot g_{\text{склад}} = 8,33 \cdot 10^{-5} \cdot 0,22 = 18,32 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1} = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

Расчетное значение величины индивидуального пожарного риска на объекте составляет $R_m = 18,32 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, что превышает допустимое значение ($R_m = 1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$), установленное ст. 93 (п.1) Федерального закона от 22 июля 2008г №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Обеспечить меньшее значение риска невозможно в связи со спецификой функционирования технологического процесса перекачки нефти и

необходимостью присутствия персонала на объекте. В таких случаях Федеральный закон № 123-ФЗ (статья 93, п.3) допускает увеличение индивидуального пожарного риска до значения $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ при соответствующем обучении персонала и его социальной защите, компенсирующих работу в условиях повышенного риска.

Заключение

Показано, что наименее надёжным звеном в системе подачи нефти является рукавная линия, которая в климатических условиях Арктики должна обладать наработкой на отказ $T \geq 640 \text{ ч}$. Целесообразность увеличения её до значения $T \geq 1000 \text{ ч}$ (достаточный запас) требует дополнительного анализа экономической эффективности. В настоящее время отсутствует единый подход к оценке величины наработки на отказ.

Показано, что техногенная безопасность ГТРТ находится на минимально допустимом уровне [6].

Опыт эксплуатации временной трубопроводной системы (в рассмотренном варианте) служит основанием для рекомендации её применения на период аварийного выхода из строя стационарных устройств или нахождения их на плановом ремонте.

Характеристики надежности элементов трубопроводной системы должны быть выражены поставщиками технологического оборудования значениями интенсивности отказов ($\lambda, \text{ч}^{-1}$) и наработки на отказ ($T, \text{ч}$), согласующимися с характеристиками типового цикла развертывания ГТРТ (по времени цикла, с учетом штормовой и прочих нагрузок).

Необходима разработка методики расчета надежности систем ГТРТ по аналогии с [11].

Литература

1. Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года: Указ Президента РФ от 05.03.2020 № 164.
2. Поляков А.С., Синельников М.Ф. Технические средства и склады горючего. Учеб. п. – Л.: Военная академия тыла и транспорта, 1973 – 121 с.
3. Сурков Н., Рамм А., Круглов А. Боевые корабли будут заправлять вдали от базы // Известия, 13 апреля 2018.
4. Артюхов Ю.О. Мобильная трубопроводная система на основе полиуретановых плоскостворачиваемых рукавов // Химическая техника. 2017. № 4.
5. Федеральный Закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997. № 116-ФЗ (с изменениями на 29.07.2018).
6. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 .07. 2008. № 123-ФЗ (с изменениями на 27.12.2018).
7. Постановление Правительства РФ от 14.11. 2014, № 1189 (ред. 14.03.2019) «Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 25.04.2012, № 390 «О противопожарном режиме» (с изменениями на 20.09. 2019).
9. Трубопровод ПМТ - Композит из плоскостворачиваемых рукавов фирмы "MILROY BUSINESS MANAGEMENT" LTD. [Электронный ресурс] URL: <http://www.milroy.biz/index/.php> (дата обращения: 03.12.2009).
10. Рыбаков Ю.Н., Харламова О.Д., Чириков С.И. Вопросы использования термопластичных рукавов для нефтепродуктов в условиях холодного климата // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 206. С.107-110.
11. ГОСТ Р58714-2019. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Трубопроводы из гибких плоскостворачиваемых рукавов. Общие технические условия.
12. Организация морской транспортировки нефти с Новопортовского месторождения // Сибирская нефть. 2014. №7(114). С.46-52.
13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (приказ МЧС РФ № 404 от 10.07.2009, с изменениями от 14.12.2010).
14. ГОСТ Р51901.1-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.
15. ГОСТ Р 27.015-2019 (МЭК 60300-3-15:2009) Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по проектированию надежности систем.
16. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.
17. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Комплексная оценка технического состояния магистрального газопровода. – Бельцы: Lap Lambert, 2017- 65 с.
18. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Козьмовский Д.В. Комплексная оценка безопасности линейной части магистрального газопровода // В сборнике: «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017» материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 322-327.
19. Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Стариченков А.Л. Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т1 № 2(48). С. 180-188.

References

1. Ob osnovah gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2035 goda [On the basis of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035]: Ukaz Prezidenta RF ot 05.03.2020 № 164.
2. Polyakov A.S., Sinel'nikov M.F. Tekhnicheskie sredstva i sklady goryuchego [Technical facilities and fuel depots]. Ucheb. p. L.: Voennaya ordena Lenina akademiya tyla i transporta. 1973. 121 p.
3. Surkov N., Ramm A., Kruglov A. Boevye korabli budut zapravlyat' vdali ot bazy [Warships will refuel away from the ba] // Izvestiya, 13. 04. 2018.
4. Artyuhov YU.O. Mobil'naya truboprovodnaya sistema na osnove poliuretanovyh ploskosvorachivaemyh rukavov [Mobile pipeline system based on polyu] // Himicheskaya tekhnika. 2017. № 4.
5. Federal'nyj Zakon «O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov» [About industrial safety of hazardous production facilities] ot 21.07.1997. № 116-FZ (s izmeneniyami 29.07.2018).
6. Federal'nyj zakon «Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti» [Technical regulations on fire safety requirements] ot 22 .07. 2008. № 123-FZ (s izmeneniyami na 27.12.2018).
7. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14.11. 2014, № 1189 (red. 14.03.2019) «Ob organizacii preduprezhdeniya i likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov na kontinental'nom shelfe Rossijskoj Federacii, vo vnutrennih morskikh vodah, v territorial'nom more i prilezhashchej zone Rossijskoj Federacii» [About the organization of the prevention and liquidation of spills of oil and oil products on the continental shelf of the Russian Federation, in internal sea waters, in the territorial sea and the adjacent zone of the Russian Federation] (s izmeneniyami i dopolneniyami).
8. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 25.04.2012, № 390 «O protivopozharnom rezhime» [About fire protection mode] (s izmeneniyami 20.09. 2019).
9. Truboprovod PMT - Kompozit iz ploskosvorachivaemyh rukavov firmy "MILROY BUSINESS MANAGEMENT" LTD. [The PMT pipeline is a Composite of flat-rolled hoses manufactured by MILROY BUSINESS MANAGEMENT LTD.] [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.milroy.biz/index/.php> (data obrashcheniya: 03.12.2009).

10. Rybakov YU.N., Harlamova O.D., Chirikov S.I. Voprosy ispol'zovaniya termoplastichnyh rukavov dlya nefteproduktov v usloviyah holodnogo klimata [Questions of using thermoplastic hoses for petroleum products in cold climate conditions] // Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2014. № 206. pp.107-110.
11. GOST R58714-2019. Magistral'nyj truboprovodnyj transport nefti i nefteproduktov. Truboprovody iz gibkih pljoskovorachivaemyh rukavov. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Main pipeline transport of oil and petroleum products. Pipelines made of flexible flat-turnable hoses. General specifications].
12. Organizaciya morskoy transportirovki nefti s Novoportovskogo mestorozhdeniya [Organization of sea transportation of oil from the Novoportovskoye field] // Sibirskaya nef'. 2014. №7 (114). pp.46-52.
13. Metodika opredeleniya raschetnyh velichin pozhnarnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah [Method for determining the calculated values of fire risk at production facilities] (prikaz MCHS RF № 404 ot 10.07.2009, s izmeneniyami ot 14.12.2010).
14. GOST R51901.1-2002. Upravlenie nadezhnost'yu. Analiz riska tekhnologicheskikh sistem [Reliability management. Risk analysis of technological systems].
15. GOST R 27.015-2019 (MEK 60300-3-15:2009) Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Rukovodstvo po proektirovaniyu nadezhnosti sistem [Reliability in technology. Reliability management. A guide to designing secure systems].
16. GOST 27.002-2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Reliability in technology. Terms and definitions].
17. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.YU. Kompleksnaya ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya magistral'nogo gazoprovoda [Comprehensive assessment of the technical condition of the main gas pipeline]. Bel'cy. Lap Lambert. 2017. 65 p.
18. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Koz'movskij D.V. Kompleksnaya ocenka bezopasnosti linejnoy chasti magistral'nogo gazoprovoda [Comprehensive safety assessment of the linear part of the main gas pipeline] // V sbornike: «Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2017» materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2017. pp. 322-327.
19. Kozhevin D.F., Polyakov A.S., Skorohodov D.A., Kaminsky V.YU., Starichenkov A.L. Ekologicheskaya bezopasnost' pri avariyah na morskoy sostavlyayushchej mul'timodal'noj truboprovodnoj sistemy [Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. T1 № 2(48). pp. 180-188.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Степанович Поляков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности С.-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: poljakov_as@mail.ru

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д.149, e-mail: t_54@mail.ru

Дмитрий Федорович Кожевин, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения С.-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Aleksandr S. Polyakov Dr. Sci. (Eng), Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor of Physical and Technical Bases of Fire Safety Department, St. Petersburg university of State fire service Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: poljakov_as@mail.ru)

Alexandr A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOME of Russia, 149, Moskovskiy Avenue, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t_54@mail.ru

Dmitriy F. Kozhevin, Ph.D. (Eng), associate professor, Head of the Physical and Chemical Bases of the Burning and Extinguishing Processes Department, St. Petersburg university of State fire service Emercom of Russia Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Пожарная безопасность транспортно-перегрузочных комплексов угля, сжиженных углеводородных газов и нефтепродуктов в морском порту

Д.Ф. Кожевин¹, А.С. Поляков¹, А.А. Таранцев^{1,2}, В.Ю. Каминский²

¹Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, ²Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук

Аннотация. Пожарная безопасность на территориях портов с совместным хранением твердых горючих материалов и сжиженных углеводородных газов (СУГ), находящихся в надземных резервуарах под давлением, при общей вместимости склада свыше 20000 м³, а также в надземных изотермических резервуарах общей вместимостью свыше 60000 м³ не регламентируется нормативно-правовыми актами в части обеспечения противопожарных расстояний. Обоснование безопасных расстояний осуществляется путём расчета величины потенциального пожарного риска, основанного на определении численных значений опасных факторов пожара склада СУГ и склада угля. В актуальных нормативных документах отсутствуют методики определения величины теплового потока при пожаре твердых горючих материалов. В статье представлены результаты анализа различных подходов по определению величины теплового потока. Приведены результаты статистических данных о пожарах на угольных предприятиях, которые позволяют определить величину потенциального риска. Выполнена оценка потенциального пожарного риска и воздействия поражающих факторов при авариях в гипотетическом морском порту с совмещенными складами СУГ и угля.

Ключевые слова: опасный фактор пожара, аварийная ситуация, пожарный риск, склад угля, резервуар сжиженных углеводородных газов, дерево событий, сценарий, морской порт.

Fire safety of transshipment terminals for coal, liquefied petroleum gases and oil products in a seaport

Dmitriy F. Kozhevina¹, Alexandr S. Polyakov¹, Alexandr A. Tarantsev², Valery Yu. Kaminsky²,

¹St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, ²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences

Abstract. Fire safety in port areas with joint storage of solid combustible materials and liquefied petroleum gases (LPG) in above-ground pressurized tanks with a total storage capacity of over 20,000 m³, as well as in above-ground isothermal tanks with a total capacity of over 60,000 m³ is not regulated by regulatory legal acts in terms of ensuring fire-prevention distances. Justification of safe distances is carried out by calculating the magnitude of the potential fire risk, based on the determination of the numerical values of the hazardous factors of a fire in an LPG warehouse and a coal warehouse. In the current regulatory documents, there are no methods for determining the magnitude of the heat flux in a fire of solid combustible materials. The article presents the results of the analysis of various approaches to determine the magnitude of the heat flow. The results of statistical data on fires at coal enterprises are given, which allow determining the magnitude of the potential risk. An assessment of the potential fire risk and impact of damaging factors in accidents in a hypothetical seaport with combined LPG and coal warehouses have been carried out.

Keywords: fire hazard, emergency, fire risk, coal storage, liquefied petroleum gas tank, event tree, scenario, seaport.

Введение

Развитие инфраструктуры морских и речных портов связано с переходом на устройство комбинированных зон хранения, что не всегда отвечает требованиям пожарной безопасности, в силу ограниченности портовой территории. Часто на территории порта необходимо разместить склады сжиженных углеводородных газов (СУГ), угля и базы нефти и нефтепродуктов. При ограниченности территории противопожарные расстояния не всегда соответствуют нормативным требованиям [1]. В подобных ситуациях допускается обосновывать противопожарное расстояние, определяя величины опасных факторов пожара (ОФП) [2].

Методики расчета потенциального риска ОФП в случае размещения складских помещений нефти и нефтепродуктов, а также сжиженных углеводородов, хорошо известны [3-5]. Однако величину противопожарных расстояний при горении твердых горючих материалов определить трудно, так как методики [2, 3] ограничены расчётом ОФП СУГ и нефтепродуктов.

В [5] предлагается расчет величины теплового потока при горении твердых горючих материалов с

оценкой геометрических размеров пламени, рассчитанных исходя из массовой скорости выгорания. Однако зависимость (В.26) [5] для определения высоты пламени применима только для жидкостей.

В работах [6, 7], исследующих геометрические характеристики пламени при горении газов, жидкостей и твердых горючих материалов (ТГМ). Показано, что ключевым аспектом корреляции высоты пламени является использование безразмерного параметра масштабирования Q^* .

Этот параметр, основанный на общей скорости тепловыделения (мощности тепловыделения) при пожаре, широко применяется для корреляции высот турбулентного диффузионного пламени. Величина мощности тепловыделения определяется аналитически, по зависимости [7]:

$$Q^* = Q_n \cdot m'' \cdot F, \quad (1)$$

где m'' – массовая скорость выгорания материала, кг м⁻² с⁻¹; F – площадь очага пожара, м²; Q_n – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

Зависимость (В.26) [5] не учитывает, что при горении ТГМ (например, на складах лесоматериалов или угля) площадь выхода газообразных веществ, при пиролизе, не ограничивается наружной поверхностью. Выход продуктов разложения осуществляется и с внутренних областей горящего горючего материала.

При определении величины теплового потока не учитывается гетерогенное (беспламенное) горение угля.

В отличие от приведённого в методических документах алгоритма оценки вероятности разгерметизации оборудования или резервуаров, вероятность возгорания угольных складов не определена.

Итак, при определении величины потенциального риска ОФП на объектах с совместным хранением угля, СУГ и нефтепродуктов в резервуарах возникают трудности, связанные с отсутствием:

- данных (справочных или нормативных) о величине вероятностей пожаров на складах хранения угля;
- методов определения опасных факторов пожара для складов твердых горючих материалов.

1 Анализ статистических данных

Для решения первой задачи в данной работе проанализированы статистические данные Ростехнадзора и ВНИИПО о пожарах на объектах угольной промышленности за период с 2007 по 2018 г.г. [8,9].

По данным статистики за 12 лет вероятность пожаров ($Q_{\text{уголь}}$) на предприятиях угольной промышленности составляет:

$$Q_{\text{уголь}} = \frac{M}{T} = 1,03 \cdot 10^{-2}, \quad (2)$$

где M – количество объектов угольной промышленности [8,9]; T – количество пожаров на объектах угольной промышленности [8,9].

Решение второй задачи – оценка ОФП для склада ТГМ - проведено сравнением результатов численного анализа по четырем вариантам расчета величины теплового потока с учетом:

- высоты факела пламени по формуле (В.26) [5];
- гетерогенного горения угля, по формуле (В.52) [5] при высоте пламени $H=0\text{м}$;
- высоты факела пламени, рассчитанной по величине мощности теплового потока из соотношения (4.22) [7];
- определения высоты факела пламени по [5].

Верификация предлагаемых расчётных зависимостей выполнена в процессе оценки величины потенциального риска для гипотетического объекта (рис.1) - морского порта с совместным (совмещенным) размещением СУГ и терминалом угля (Свободный порт Ванино [10,11]).



Рис. 1. Расположение объектов в Свободном порту Ванино

Оценка потенциального риска (в качестве примера) проведена для резервуарного парка с двумя изотермическими резервуарами (резервуар Е-1 с бутаном массой 30050т, при давлении 0,023 МПа и температуре -10°C ; резервуар Е-2 с пропаном массой 42240т, при давлении 0,023 МПа и температуре -50°C) и двумя резервуарами под давлением (Е-3/1 и Е-3/2 с пропаном массой 1056т, при давлении 1,84 МПа и температуре $+5...+40^{\circ}\text{C}$), а также угольного склада (площадь $100 \times 50\text{м}^2$; хранение угля - навалом со степенью сосредоточенности более $2\text{ м}^3/\text{м}^2$ и высотой более двух метров).

Характеристики опасных веществ, обращающихся на транспортно-перегрузочном комплексе для перевалки угля с терминалом СУГ (рис. 2), приняты по [12].



Рис. 2. Территория проектируемого специализированного транспортно-перегрузочного комплекса на мысе Ая в бухте Мучке п. Ванино [11]

Далее представлены основные сценарии возникновения пожароопасных аварийных ситуаций, связанных с полной разгерметизацией резервуаров и пожаром на угольном складе.

Сценарии С₁-С₇ связаны с полной разгерметизацией оборудования с СУГ под давлением и воздействием ОФП на персонал и объекты, расположенные рядом.

Сценарии С₈-С₁₄ связаны с полной разгерметизацией изотермических резервуаров СУГ и воздействием ОФП на персонал и близлежащие объекты.

Сценарий С₁₅ - пожар на угольном складе с термическим воздействием сгорающего вещества на технологическое оборудование, вызвавшем разгерметизацию резервуаров с СУГ (BLEVE - Boiling liquid Expanding Vapour Explosion - взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости.).

2. Расчет вероятностей реализации сценариев

Построение сценариев (С₁–С₁₄) возникновения и развития аварийных ситуаций предусматривает проведение оценки риска для случаев полного разрушения оборудования. Размеры аварийных отверстий приняты по табл. П1.1 и П1.2 из [3].

Расчет вероятностей проводился по способу построения деревьев событий. При этом сценарии возникновения и развития пожароопасных ситуаций

отражаются в виде последовательности событий (от исходного до конечного события) [13].

Дерево событий, инициированных полным разрушением резервуара цистерны (сценарии С₁–С₇) приведено на рис. 3. Дерево событий подобной конфигурации и с такими же вероятностными характеристиками отражает полную разгерметизацию изотермических резервуаров СУГ (сценарии С₈–С₁₄). Вероятность реализации сценария (BLEVE) С₁₅ принята равной единице.

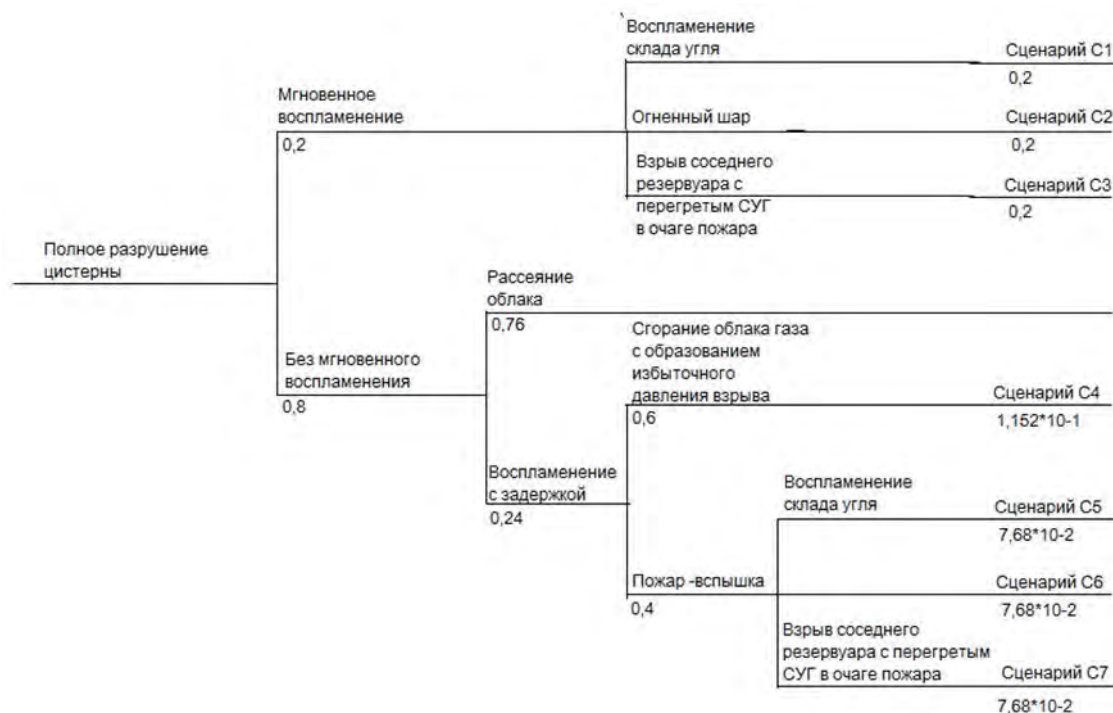


Рис. 3. Дерево событий при полной разгерметизации оборудования с газом под давлением

Частота реализации пожароопасных ситуаций определялась исходя из статистических данных.

Разгерметизация оборудования приводит к аварийному процессу, при котором опасные вещества, обращающиеся на комплексе, вовлекаются в непредусмотренные технологическим регламентом процессы (прежде всего физико-химические) – взрывы и пожары, и создают поражающие факторы – ударные и тепловые нагрузки, оказывающие влияние на объект, персонал, население и окружающую среду.

Информация о частотах реализации пожароопасных ситуаций (в том числе возникших в

результате ошибок персонала), необходимая для оценки риска, основана на статистических данных, приведенных в П1 [3].

Частота реализации каждого пожароопасного сценария рассчитана путем умножения частоты инициализации основного события на условную вероятность конечного события (сценария аварии).

Частота возникновения инициирующих пожароопасную ситуацию событий, для полной разгерметизации резервуаров (Е-1, Е-2, Е-3/1, Е-3/2) определена по [3] и составляет $3 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}$. Частота возникновения пожара на угольном складе составляет $1,03 \cdot 10^{-2} \text{год}^{-1}$.

Таблица 4

Сценарии по разгерметизации оборудования С₁–С₁₄

Номер оборудования	Частота реализации событий, инициирующих пожар, год ⁻¹						
	С ₁ , С ₈ Воспламенение угля	С ₂ , С ₉ Огненный шар	С ₃ , С ₁₀ BLEVE	С ₄ , С ₁₁ Избыточное давление взрыва	С ₅ , С ₁₂ Воспламенение угля	С ₆ , С ₁₃ Пожар-вспышка	С ₇ , С ₁₄ BLEVE
	2,00E-01	2,00E-01	2,00E-01	1,15E-01	7,68E-02	7,68E-02	7,68E-02
Е-3/1; Е-3/2; Е-1, Е-2	6,00E-08	6,00E-08	6,00E-08	3,46E-08	2,30E-08	2,30E-08	2,30E-08

Количество опасных веществ в резервуарах, аппаратах и трубопроводах определяется исходя из вида обрабатываемого вещества, объема аппаратов, температуры и давления в них.

Расчеты вероятных зон поражения взрывной волной проводятся по методу оценки параметров

волны давления при сгорании газо-, паро- или пылевоздушного облака (П1 [3]; формулы (П3.36-П.3.46)).

Результаты расчета зон поражения взрывной волной при взрыве ТВС приведены в табл. 2.

Таблица 5

Результаты расчета зон поражения взрывной волной при взрыве ГВС

Наименование оборудования	Количество опасного вещества, участвующее в создании поражающих факторов, т	Характеристика области с максимальным избыточным давлением			Расстояние от центра облака (м) с давлением во фронте ударной волны			
		R, м	P, кПа	I, кПа с	100 кПа	28 кПа	12 кПа	5 кПа
E-1	30050	320	1800	87	870	>1250	>1250	>1250
E-2	42240	330	1800	91	910	>1250	>1250	>1250
E-3/1; E-3/2	1056	90	1800	26,9	265	545	980	>1250

Расчеты вероятных зон поражения при реализации сценария «Пожар-вспышка» проводились по методу определения радиуса воздействия продуктов сгорания газозвушного

облака (П1 [3]; формулы (П.3.32 - П.3.35)). Результаты расчета зон поражения представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета зон поражения при реализации сценария «пожар-вспышка»

Наименование оборудования	Количество опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов, т	Радиус зоны НКПР, м	Высота зоны НКПР, м	Радиус воздействия продуктов сгорания
E-1	30050	1004	33.5	1205
E-2	42240	1286	42.8	1543
E-3/1; E-3/2	1056	380,7	12,7	456,8

Расчет вероятных зон поражения при реализации сценария «Огненный шар» проводился по методу расчета интенсивности теплового излучения (П1 [3]; формулы (П.3.52, П.3.63-П3.66)).

Результаты расчета зон поражения представлены в табл.4.

Таблица 7

Результаты расчета зон поражения при реализации сценария «Огненный шар»

Наименование оборудования	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ²	Расстояние от геометрического центра пролива, м
E-1, E-2	35,0*	1100
	10,5	>1250
	7	>1250
	4,2	>1250
	1,4	>1250
E-3/1; E-3/2	35,0*	630
	10,5	1220
	7	>1250
	4,2	>1250
	1,4	>1250

* –критическая плотность теплового потока для воспламенения угля

Расчет вероятных зон поражения при возгорании угля проводился по методу расчета интенсивности теплового излучения (П1 [3,5]). Интенсивность

теплового излучения q рассчитывалась по формулам (В27-В34). Результаты расчета зон поражения представлены в табл.5.

Таблица 8

Результаты расчета зон поражения при реализации пожара угля

Варианты	Наименование оборудования	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ²	Расстояние от геометрического центра развала, м
Варианты №1, №2, №3	Склад угля	0	0
Вариант №4		35,0*	130
		10,5	170
		7	>1250
		4,2	>1250
1,4	>1250		

Результаты расчетов поражающих факторов при реализации всех сценариев пожара, на расстояниях от 0 до 1000м с шагом 10м, пересчитаны на потенциальный риск и приведены на рис. 4-6.

Величина потенциального пожарного риска $P(a)$ (год⁻¹) (далее – потенциальный риск) в определенной

точке (а) на территории объекта и в селитебной зоне вблизи объекта определялась по формуле (1)[3].

Условные вероятности поражения человека $Q_{dj}(a)$ определялись по значениям пробит-функций.

Результаты оценки потенциального риска приведены на рис. 4-6.

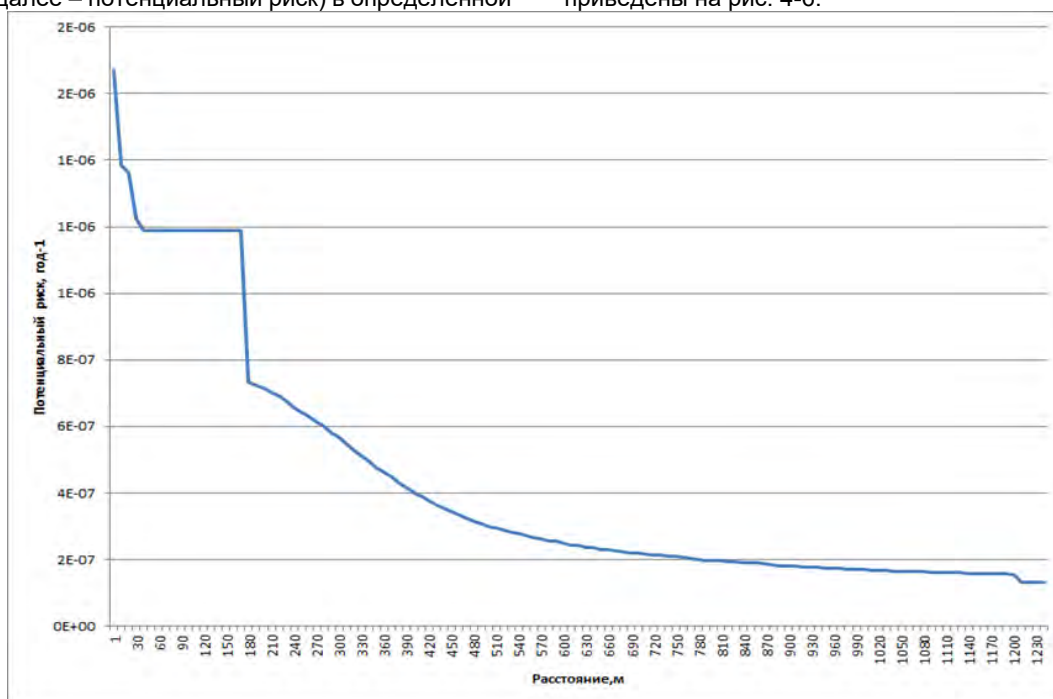


Рис. 4. Потенциальный риск при разрушении резервуаров E-1 и E-2



Рис.5. Потенциальный риск при разрушении резервуаров E-3/1 и E-3/2



Рис. 6. Потенциальный риск при пожаре на складе угля

Заключение

Анализ результатов расчётов показывает, что при подобной планировке земельного участка в аварийных ситуациях, связанных с разгерметизацией резервуаров с СУГ, возможно воспламенение угольного склада. При пожаре на угольном складе воздействие теплового потока в рамках сценариев №1-№4 не приводит к нагреву резервуаров с СУГ.

Для определения величины потенциального риска на объектах хранения ТГМ необходима доработка методики расчета пожарных рисков. Существующие зависимости для определения величины теплового потока при горении ТГМ основываются на величине высоты факела пламени, но в известных методиках определение этой высоты

справедливо только для пожаров проливов жидкостей. Использовать эти формулы для определения высоты пламени ТГМ - некорректно, поскольку высота зависит не только от площади размещения пожарной нагрузки, но и - в первую очередь - от высоты складирования. Кроме того, горение ТГМ не всегда сопровождается пламенем (возможно гетерогенное горение угля), а тепловой поток при этом имеет значительную величину.

Предложены варианты внесения корректировок в методику расчета величины теплового потока при пожаре ТГМ.

Проведен анализ статистических данных за двенадцать лет по случаям возгорания угля на угольных предприятиях.

Литература

1. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22 .07. 2008. № 123-ФЗ (с изменениями на 27.12.2018).
2. СП 4.13130.2013 Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 01.09.2019).
3. Приказ МЧС России № 404 от 10.07.2009 г. «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
4. ГОСТ Р12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Дата введения 2014-01-01.
5. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1) [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru> (дата обращения: 01.09.2019).
6. Alston, J.J. and Dembsey, N.A., 2003. Evaluation Of Dimensionless Flame Height Parameters To Account For Fuel Source Effects. Fire Safety Science 7: pp.569-580.
7. Абдрахманов Р.Х., Бояршинов Б.Ф. Тепловая и динамическая структура пламени этанола в пограничном слое вблизи преграды // Физика горения и взрыва. 2016. Т 52 №1. С. 30-39.
8. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2007 году. — М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. — 548 с.
9. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году. — М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2019. — 410 с.
10. <http://www.vtu27.ru/port/#>. Порт Ванино. [В Интернете].
11. <http://voshod.vanino.org/?act=news&id=689>. Восход-Ванино. [В Интернете].
12. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средств их тушения: Справ. изд.: в 2 книгах; кн.1 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. — М.: Химия, 1990.- 496 с.
13. Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Стариченков А.Л. Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т1 № 2(48). С. 180-188.

References

1. Federal'nyj zakon «Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti [Technical regulations on fire safety requirements]» ot 22.07.2008. № 123-FZ (s izmeneniyami na 27.12.2018).
2. SP 4.13130.2013 Sistemy protivopozharnoj zashchity. Ogranichenie rasprostraneniya pozhara na ob"ektah zashchity. Trebovaniya k ob"emno-planirovochnym i konstruktivnym resheniyam [Fire protection system. Limiting the spread of fire at protection facilities. Requirements for space-planning and design solutions]. [Elektronnyj resurs] URL: <http://docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 01.09.2019).
3. Prikaz MCHS Rossii № 404 ot 10.07.2009 g. «Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah [About the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities]».
4. GOST R12.3.047-2012 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh processov. Obshchie trebovaniya. Metody kontrolya [Occupational safety standards system (OSS). Fire safety of technological processes. General requirements. Control method]. Data vvedeniya 2014-01-01.
5. SP 12.13130.2009 Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzyrvopozharnoj i pozharnoj opasnosti [Determination of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazard] (s izmeneniyami № 1) [Elektronnyj resurs] URL: <http://docs.cntd.ru> (data obrashcheniya: 01.09.2019).
6. Alston, J.J. and Dembsey, N.A., 2003. Evaluation Of Dimensionless Flame Height Parameters To Account For Fuel Source Effects. Fire Safety Science 7: pp.569-580.
7. Abdrahmanov R.H., Boyarshinov B.F. Teplovaya i dinamicheskaya struktura plameni etanola v pogranichnom sloe vblizi pregrady [Thermal and dynamic structure of ethanol flame in the boundary layer near the barrier] // Fizika goreniya i vzyryva. 2016. T 52 №1. pp. 30-39.
8. Godovoj otchet o deyatelnosti Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2007 godu [Annual report on the activities of the Federal service for environmental, technological and nuclear supervision in 2007]. M. Otkrytoe akcionernoe obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij centr po bezopasnosti v promyshlennosti». 2008. 548 p.
9. Godovoj otchet o deyatelnosti Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2018 godu [Annual report on the activities of the Federal service for environmental, technological and nuclear supervision in 2018]. M. Otkrytoe akcionernoe obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij centr po bezopasnosti v promyshlennosti». 2019. 410 p.
10. <http://www.vtu27.ru/port/#>. Port Vanino [Vanino port]. [V Internete].
11. <http://voshod.vanino.org/?act=news&id=689>. Voskhod-Vanino [Sunrise-Vanino]. [V Internete].
12. Pozharovzryvobezopasnost' veshchestv i materialov i sredstv ih tusheniya [Fire and explosion safety of substances and materials and means of extinguishing them]. Sprav. izd. v2 knigah.kn.1 / A.N. Baratov, A.YA. Korol'chenko, G.N. Kravchuk i dr. M. Himiya. 1990. 496 p.
13. Kozhevin D.F., Polyakov A.S., Skorohodov D.A., Kaminsky V.YU., Starichenkov A.L. Ekologicheskaya bezopasnost' pri avariayah na morskoy sostavlyayushchej multimodal'noj truboprovodnoj sistemy [Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. T1 № 2(48). pp. 180-188.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Федорович Кожевин, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения С.-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

Dmitriy F. Kozhevin, Ph.D. (Eng), associate professor, Head of the Physical and Chemical Bases of the Burning and Extinguishing Processes Department, St. Petersburg university of State fire service EMERCOME of Russia, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: yagmort_kdf@mail.ru

Александр Степанович Поляков, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности С.-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: poljakov_as@mail.ru

Aleksandr S. Polyakov Dr. Sci. (Eng), Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor of Physical and Technical Bases of Fire Safety Department, St. Petersburg university of State fire service EMERCOME of Russia, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: poljakov_as@mail.ru

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д.149, e-mail: t__54@mail.ru

Alexandr A. Tarantsev, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOME of Russia, 149, Moskovskiy Avenue, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t__54@mail.ru

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng) Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

УДК 656.62.064

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.028

Оценка эффективности снабжения судоходных компаний материально-техническими ресурсами

В.В. Цверов¹, Е.Г. Бугрова², В.Н. Костров¹, Д.А. Коршунов¹¹Волжский государственный университет водного транспорта²ВодоходЪ

Аннотация. В данной статье приведены результаты исследований авторов по оценке эффективности вариантов технологии и организации снабжения материально-техническими ресурсами судоходных компаний на внутреннем водном транспорте. В качестве оценочных показателей предлагается использовать логистические издержки, связанные со снабжением (затраты на закупку и доставку материально-технических ресурсов на суда, сокращение дохода вследствие снижения провозной способности флота из-за затрат времени на снабжение и снижения загрузки судов из-за хранения запасов материально-технических ресурсов), и ряд эксплуатационных показателей работы флота (валовая производительность, продолжительность оборота, своевременность доставки и выдачи груза получателям, путевая скорость, эксплуатационная скорость судов, эксплуатационно-экономический показатель), которые зависят от оперативности снабжения. Цель исследования заключалась в разработке методического подхода к оценке эффективности при моделировании систем снабжения материально-техническими ресурсами судоходных компаний на речном транспорте.

Ключевые слова: логистика снабжения, судоходная компания, речной транспорт, эффективность организации снабжения, моделирование снабжения.

Evaluation of the efficiency of supply of material and technical resources to shipping companies

Vladimir V. Tsverov¹, Ekaterina G. Bugrova², Vladimir N. Kostrov¹, Dmitry A. Korshunov¹¹Volga State University of Water Transport²VODOHOD

Abstract. This article presents the results of the authors' research on evaluating the effectiveness of technology options and organizing the supply of material and technical resources to shipping companies on inland water transport. As the performance indicators it is proposed to use the logistic costs of supply (costs for the purchase and delivery of material and technical resources for the court, a reduction in income due to a decrease in the carrying capacity of the fleet because of the time supply and reduce load of vessels for storage of stocks of material and technical resources), and a number of operational indicators fleet (gross productivity, turnover duration, timeliness of delivery and delivery of cargo to the recipient, ground speed, operating speed vessels, operational and economic indicators), which depend on the efficiency of supply.

The purpose of the study was to develop a methodological approach to evaluating the effectiveness of modeling logistics systems for shipping companies on river transport.

Key words: supply logistics, shipping company, river transport, the efficiency of the supply chain modeling the supply chain.

Введение

Логистические из-за издержки, связанные со снабжением судов материально-техническими ресурсами (МТР), к которым относятся: топливом, материалы, запасные части, навигационные материалы, вода, продукты питания и др. виды МТР, - составляют до 70% всех расходов речных судоходных компаний. Что обуславливает необходимость внимания к этой сфере деятельности и приводит к тому, что система обеспечения организаций речного транспорта (РТ) материально-техническими ресурсами почти три десятилетия постоянно меняется [14, 15]. Это происходит вследствие кардинальных изменений условий хозяйственной деятельности после перехода от административной (централизованной) системы управления к рыночной (децентрализованной). При административной системе управления была отработана соответствующая ей, основанная на многочисленных научных исследованиях, научная организация централизованного снабжения в виде системы комплексного обслуживания флота (КОФ) по речным бассейнам [4-5, 7, 1, 20, 11]. В рыночных

условиях система КОФ в том виде, в котором она действовала ранее, перестала быть эффективной. И начались постоянные эксперименты изменения системы снабжения в отдельных судоходных компаниях: в начале появилась тенденция к обособленному снабжению отдельных судоходных компаний, потом объединению судоходных компаний и других хозяйствующих субъектов для совместного снабжения по отдельным видам снабжения и др. Не многочисленные исследования по совершенствованию снабжения судов [16-19, 21] упираются в отсутствие соответствующей современным условиям деятельности научно-обоснованной методики оценки их эффективности. В ряде работ было обосновано целесообразность создания сетей баз снабжения материально-техническими ресурсами [25 - 26] на основе критерия издержки по снабжению. При этом изменение организации снабжения сказывается также на комплексе эксплуатационных показателей [22]. В сложившихся условиях для количественной оценки последствий моделирования (изменения) организации и технологии снабжения МТР требуется соответствующее методическое обеспечение.

На речном транспорте наиболее значимыми по затратам видами МТР, по которым требуется организация снабжения являются снабжение топливом, материалами и запасными частями. Состав издержек, связанных со снабжением по этим видам МТР отличается. Например, наличие запасов топлива на судне снижает количество перевозимого груза, а при снабжении запасными частями в случаях поломок возникают простои судов в ожидании доставки требуемых МТР. Это требует разработки методик оценки технологий снабжения, учитывающих особенности видов МТР.

1. Оценка издержек судоходной компании, связанных со снабжением материалами и запчастями

Исходя из исследований [15, 24] указанные издержки предлагается определять по выражению:

$$I = Z_{эд} + Z_{сз} + I_{плс} + I_{нпс} + Z_{эск}, \quad (1)$$

где *I* – суммарные издержки СК, связанные со снабжением МТР, руб.;

Z_{эд} – расходы по закупке и доставке МТР от поставщиков на базы снабжения, руб.;

Z_{сз} – расходы на содержание запасов, руб.;

I_{плс} – издержки, связанные с плановым снабжением судов МТР, руб.;

I_{нпс} – издержки, связанные со снабжением при неплановых ремонтах судов в пути, руб.;

Z_{эск} – расходы, связанные с эксплуатацией складского хозяйства, руб.

$$I_{плс} = Z_{дс-п} + I_{этс} + I_{птс}, \quad (2)$$

где *Z_{дс-п}* – расходы по доставке МТР с баз на суда при плановом снабжении потребителей, руб.;

I_{этс} – издержки по эксплуатации транспортных средств, связанные с плановым пополнением необходимых МТР, руб.;

I_{птс} – издержки от потери провозной способности транспортных средств из-за отвлечения на операции планового снабжения МТР, руб.

$$I_{птс} = Z_{дс-п} + I_{этсн} + I_{прс}, \quad (3)$$

где *Z_{дс-п}* – расходы по доставке МТР с баз на суда при срочном снабжении потребителей, руб.;

I_{этсн} – издержки по эксплуатации транспортных средств, из-за задержек при неплановом ремонте судов в пути, связанных с доставкой запасных частей, руб.;

I_{прс} – издержки от потери провозной способности транспортных средств из-за задержек при неплановом ремонте судов в пути, связанных с доставкой запасных частей, руб.

Расходы на содержание запасов определяются по формуле:

$$Z_{сз} = Z_{тз} + Z_{эз}, \quad (4)$$

где *Z_{тз}* – расходы на содержание текущих запасов, руб.;

Z_{эз} – расходы на содержание гарантийных запасов, руб.

Расходы по закупке и доставке МТР от поставщиков на базы снабжения

$$Z_{эд} = N_{мр} \cdot C_{мр} \cdot ((1-V_i) \cdot (1-K_{цос}) + (V_i \cdot (1+K_{цсп}))), \quad (5)$$

где *N_{мр}* – объем снабжения за навигацию в единицах МТР, ед.;

C_{мр} – цена единицы МТР базовая (без скидок и наценок), руб.;

K_{цос} – коэффициент, учитывающий объемные скидки при поставках;

V_i – коэффициент вариации потребности МТР на *i*-й базе снабжения;

K_{цсп} – коэффициент, учитывающий надбавку за срочность поставки.

Апробация научно-методического подхода оценки эффективности снабжения в речных судоходных компаниях материально-техническими ресурсами была проведена при сравнении вариантов технологии снабжения материалами и запасных частями одной из судоходных компаний, осуществляющей деятельность в границах Центрального и Северо-западных речных бассейнов: – обособленно (через свои базы); – и через сеть баз общего пользования, состоящую из 13 баз [26].

Результаты расчетов по этой оценке приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка эффективности перехода от снабжения МТР через свои базы к снабжению через базы сети общего пользования для СК «ТФ»

Показатели	Издержки по вариантам снабжения, млн. руб.		Сокращение издержек	
	Базовый – через свои базы	Проектный – через сеть баз общего пользования	млн. руб.	в %
Суммарные издержки (<i>I</i>)	17,54	13,28	4,26	24
Расходы по закупке и доставке МТР от поставщиков на базы снабжения (<i>Z_{эд}</i>)	13,31	11,04	2,27	17
Расходы на содержание запасов (<i>Z_{сз}</i>)	1,14	0,88	0,26	23
Издержки, связанные с плановым снабжением судов МТР (<i>I_{плс}</i>)	0,81	0,39	0,42	52
Издержки, связанные со снабжением при неплановых ремонтах судов в пути (<i>I_{нпс}</i>)	2,28	0,96	1,32	58

Апробация показала возможность использования приведенного подхода для целей оценки издержек, связанным со снабжением судов речных судоходных компаний МТР, по вариантам технологии снабжения.

2. Оценка издержек судоходных компаний, связанных со снабжением судов топливом

При снабжении флота топливом возможно два принципиальных подхода:

1-й – бункеровочные компании, задействованные в снабжении судов судоходной компании, являются

поставщиками нефтепродуктов;

2-й - бункеровочным компаниям предоставляют услуги бункеровки нефтепродуктами, приобретаемыми судоходными компаниями и передаваемыми на хранение бункеровочным компаниям (на «давальческом» топливе).

Логистические издержек судоходных компаний, связанных со снабжением судов топливом, исходя из исследований [15], определяется: при первом подходе по формуле (6), а при втором подходе по формуле (7):

$$З = З_{тб} + З_{сб} + И_{ис} + И_{сгр} + И_{псз} + И_{псб}, \quad (6)$$

$$З = З_{т} + З_{д} + З_{б} + З_{сб} + И_{ис} + И_{ибс} + И_{сгр} + И_{псз} + И_{псб}, \quad (7)$$

где $З$ – суммарные издержки СК, связанные со снабжением нефтепродуктами, руб.;

$З_{тб}$ – затраты по платежам за нефтепродукты и бункеровку, руб.;

$З_{сб}$ – затраты по судам за время бункеровки, руб.;

$И_{ис}$, $И_{сгр}$ – издержки, связанные с иммобилизацией денежных средств в циклические и страховые запасы нефтепродуктов, находящиеся на судах, руб.;

$И_{псз}$, $И_{псб}$ – издержки, связанные с уменьшением провозной способности флота, соответственно, из-за хранения на судне запаса нефтепродуктов и из-за отвлечения судов на операции связанные со снабжением, руб.;

$З_{т}$, $З_{д}$ – затраты соответственно по закупке и доставке топлива и других нефтепродуктов от поставщиков в пункты бункеровки, руб.;

$З_{б}$ – плата за услугу бункеровки, руб.;

$И_{ибс}$ – издержек на иммобилизацию денежных средств в циклические запасы «давальческого» топлива и других нефтепродуктов на бункеровочных станциях.

При использовании *варианта бункеровки на «давальческом» топливе* кроме издержек на иммобилизацию денежных средств в циклические запасы в судах должны учитываться издержек на иммобилизацию денежных средств в циклические запасы «давальческого» топлива на бункеровочных станциях, а затраты по платежам за нефтепродукты и бункеровку ($З_{тб}$) преобразуются в три составляющих: затраты по поставкам, доставке и услуге бункеровки.

Апробация приведенной методики применительно к оценке логистических издержек при изменении количества предоставляющих услуги бункеровочных станций в речном бассейне и выборе бункеровочных станций в качестве основных партнеров в речном бассейне показали ее работоспособность [15].

3. Оценка уровня эксплуатационных показателей при изменении технологии снабжения судов

На речном транспорте в качестве основных показателей развития используются

эксплуатационные показатели (валовая производительность, продолжительность оборота, эксплуатационно-экономический показатель, своевременность доставки и выдачи груза получателям, показатель выполнения графика движения и ряд других). При расчете фактических показателей эксплуатации речного транспорта влияние уровня оперативности снабжения учитывается [2-3, 6, 8-10, 12-13], но аналитические зависимости расчета этих показателей при планировании и моделировании транспортных процессов почти для всех показателей не позволяют учесть влияние изменения в организации снабжения. В работах авторов [22-23, 27] доказано наличие зависимости составляющих, входящих в формулы расчета эксплуатационных показателей речного транспорта от уровня оперативности снабжения, и предложены аналитические зависимости, позволяющих проводить их расчеты при изменении оперативности снабжения.

Для отражения степени влияния снабжения на эксплуатационную деятельность предлагается использовать показатель, учитывающий уровень оперативности снабжения флота, который может быть определен по формуле (8) в процентах от продолжительности эксплуатационного периода

$$К_{осф} = \frac{T_{пл}}{T_{э}} \cdot 100, \quad (8)$$

где $T_{э}$ – плановая продолжительность эксплуатационного периода, сут;

$T_{пл}$ – затраты флота, связанные с уровнем организации снабжения, за плановый период, сут.

Применительно к снабжению материалами и запасными частями затраты флота, связанные с уровнем организации снабжения, определяются по формуле

$$T_{плф} = N_{рпо} \cdot (t_{сгр} \cdot d_{ро} + t_{снп} \cdot d_{рх}) \quad (9)$$

где $N_{рпо}$ – среднее количество неплановых ремонтов в пути за навигацию по судну, ед.;

$t_{сгр}$ – средняя продолжительность стоянки при неплановом ремонте в пути, связанная с ожиданием снабжения запчастями, сут;

$t_{снп}$ – средняя продолжительность стоянки при неплановом ремонте в пути, связанная с ожиданием снабжения запчастями, сут;

$d_{ро}$ – коэффициент, учитывающий долю неплановых ремонтов в пути осуществляемых с остановкой;

$d_{рх}$ – коэффициент, учитывающий долю неплановых ремонтов в пути осуществляемых в ходу.

Аналитические зависимости для расчета эксплуатационных показателей работы флота, используемые в настоящее время, и предлагаемые авторами, учитывающие уровень организации снабжения, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Аналитические зависимости для расчета эксплуатационных показателей работы флота

Показатель	Аналитическая зависимость	
	используемая в настоящее время	с учетом фактора уровня организации снабжения для отдельной линии
Продолжительность оборота ($t_{об}$)	$t_n + t_b + t_{хг} + t_{пор} + t_{тн} + t_{тп} + t_{тк}$	$t_{обс} \cdot (100 + K_{осфл}) / (100 + K_{осфб})$
Своевременность доставки и выдачи груза получателям (T_d)	$t_n + t_b + t_{хг} + t_{тп} + t_{доп}$	$\frac{(t_{пс} + t_{вс} + t_{хгс} + t_{допс})}{(100 + K_{осфл})} / (100 + K_{осфс})$
Путевая скорость ($V_{п}$)	$L_{г} / (L_{г} / V_{т} + 2 \cdot Q_{с} \cdot K_{иг} / P_{с} + t_{доп})$	$L_{г} / ((t_n + t_b + t_{хг} + t_{доп}) \cdot (100 - K_{осфл}) / (100 - K_{осфб}))$
Эксплуатационная (техническая) скорость судов ($V_{т}$)	$\sum(Q_{р} \cdot L_{г}) / \sum(Q_{р} \cdot T_{э} \cdot K_{хг})$	$L_{г} / ((t_{хг} \cdot (100 - K_{осфл}) / (100 - K_{осфб}))$
Валовая производительность (G_I)	$\sum(Q_{р} \cdot K_{иг} \cdot V_{п} \cdot K_{хг} \cdot T_{э}) / \sum(Q_{р} \cdot T_{э})$	$Q_{р} \cdot K_{иг} \cdot L_{г} / (Q_{р} \cdot L_{г} \cdot (100 - K_{осфл}) / (100 - K_{осфс}))$
Эксплуатационно-экономический показатель ($S_{тэ}$)	$Z_{мтс} / (Q_{р} \cdot T_{н} \cdot K_{эг})$	$(N_{сзч} \cdot Ц(Y_{ос}) + Z_{зд}(Y_{ос}) + Z_{здсп}(Y_{ос}) + Z_{сз}(Y_{ос})) / (Q_{р} \cdot T_{н} \cdot K_{тгф} \cdot (100 - K_{осфл}) / (100 - K_{осфб}))$

Обозначения:

$Z_{зд}(Y_{ос})$ – расходы по закупке и доставке МТР от поставщиков на базы снабжения, как функция от организации снабжения, руб.;

$Z_{здсп}(Y_{ос})$ – расходы при срочной закупке и доставке МТР от поставщиков на базы, как функция от организации снабжения, руб.;

$Z_{сз}(Y_{ос})$ – расходы на содержание запасов, как функция от организации снабжения, руб.;

$Z_{мтс}$ – затраты по материально-техническому снабжению эксплуатируемого флота, руб.;

$K_{иг}$ – коэффициент использования грузоподъемности судна;

$K_{хг}$ – коэффициент использования времени на ход с грузом;

$K_{осфл}, K_{осфс}$ – показатель уровня оперативности снабжения флота, соответственно, в проектном и с базовом вариантах организации снабжения.

$K_{тгф}$ – коэффициент технической готовности флота;

$K_{эг}$ – показатель эксплуатационной готовности флота;

$Y_{ос}$ – уровень оперативности снабжения;

$Ц(Y_{ос})$ – средняя стоимость единицы сменно-запасных частей, как функция от организации снабжения, руб.;

$N_{сзч}$ – требуемое количество сменно-запасных частей за отчетный период на техническую эксплуатацию флота, ед.;

$L_{г}$ – расстояние перевозки груза, км;

$Q_{р}$ – грузоподъемности судна, т;

$Q_{с}$ – загрузка судна, т;

$P_{с}$ – средневзвешенная суточная норма грузовых работ в порту отправления и назначения, т/сут;

$T_{н}$ – продолжительность навигации, сут;

$T_{пф}$ – простой флота в связи с задержками в снабжении за плановый период при соответствующем уровне организации снабжения, сут;

$T_{тор}$ – продолжительность технического обслуживания и ремонтов за навигацию, сут;

$T_{э}$ – продолжительность эксплуатационного периода, сут;

t_b – затраты времени на выгрузку, сут;

$t_{вс}$ – затраты времени на выгрузку при базовом варианте снабжения, сут;

$t_{доп}$ – время на дополнительные операции, сут;

$t_{обс}$ – продолжительность оборота грузового судна при базовой системе снабжения, сут;

t_n – затраты времени на погрузку, сут;

$t_{пор}$ – затраты времени на ход порожнем, сут;

$t_{порс}$ – затраты времени на ход порожнем при базовом варианте снабжения, сут;

$t_{пс}$ – затраты времени на погрузку при базовом варианте снабжения, сут;

$t_{тк}$ – затраты времени на технические и другие операции в конечном, пункте, сут;

$t_{тн}$ – затраты времени на технические и другие операции в начальном, пункте, сут;

$t_{тп}$ – затраты времени на технические и другие операции в пути, сут;

$t_{хг}$ – затраты времени на ход с грузом, сут;

$t_{хгс}$ – затраты времени на ход с грузом при базовом варианте снабжения, сут.

Результаты расчета основных эксплуатационных показателей работы флота при изменении вариантов организации снабжения по отдельному судну применительно к круговому рейсу: Камский грузовой район – Астрахань с песчано-гравийной смесью приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета эксплуатационных показателей работы флота при изменении условий снабжения запасными частями и материалами

Показатель	Значение показателя по вариантам организации снабжения запчастями и материалами	
	Через свои базы	Через сеть баз общего пользования
Затраты времени на снабжение запчастями и материалами за навигацию по судну, сут	6,2	2,25
Продолжительность оборота, сут	9,7	9,5
Своевременность доставки и выдачи груза получателям, сут	5,7	5,5
Путевая скорость, км/сут	340	347
Эксплуатационная (техническая) скорость, км/сут	390	398
Валовая производительность, т-км/тоннаже-сут	171,7	175,2
Эксплуатационно-экономический показатель (в части снабжения запасными частями и материалами), руб./ тоннаже-сут	65,9	55,7
Показатель уровня оперативности снабжения флота (в части снабжения запасными частями и материалами), %	3,1	1,1

Заключение

Основные результаты исследования сводятся к следующему:

- разработан научно-методический подход к оценке результатов изменения (моделирования) технологии и организации снабжения судов МТР в речных бассейнах как по логистическим издержкам, связанным со снабжением, так и по показателям эксплуатации флота;

- апробация предложенного научно-методического подхода на примерах изменения варианта условий снабжения запасными частями, изменения количества бункеровочных станций и оценки выбора бункеровочной компаний в качестве основного партнера в бассейне внутренних водных путей показала практическую возможность их применения при оценке проектных решений в снабжении флота.

Литература

1. Блинов, Э.К. Комплексное обслуживание судов в морских портах / Э.К. Блинов, А.М. Дуберштейн. – М. : Транспорт, 1975. – 208 с.
2. Брухис, Г.Е. Коммерческая эксплуатация морского транспорта : учеб. Для судоводит. спец. и учеб. пособие для эксплуатац. спец. мореход. уч-щ / Г.Е. Брухис, Н.А. Луцан.– М. : Транспорт, 1985. – 264 с.
3. Гурвич, Г.Е. Коммерческая эксплуатация морского судна : учебник / Г.Е. Гурвич, Э.А. Лимонов. – М. : Транспорт, 1983. – 258 с.
4. Захаров, В.Н. Исследование вопросов оптимизации технологии комплексного обслуживания транспортного флота в портах / В.Н. Захаров, В.И. Кожухарь, А.И. Чернов // Труды ГИИВТ. – 1974. – Вып. 134. – С. 186–201.
5. Захаров, В.Н. Организация и управление комплексным обслуживанием флота в портах : учеб. пособие / В.Н. Захаров, Э.С. Цветков, А.И. Чернов. – Горький : ГИИВТ, 1976. – 58 с.
6. Захаров, В.Н. Организация работы речного флота : учебник для вузов / В.Н. Захаров, В.П. Зачесов, А.Г. Малышкин. – М. : Транспорт, 1994. – 287
7. Зинь, Э.А. Комплексное обслуживание флота / Э.А. Зинь [и др.] ; под. ред. Э.А. Зиня, К.С. Ляхова. – М. : Транспорт, 1974. – 232 с.
8. Зинь, Э.А. Экономика и организация работы речного транспорта Сибири и Дальнего Востока : / Э.А. Зинь. – М. : Транспорт, 1979. – 112 с.
9. Ирхин А.П., Суворов В.С., Щепетов В.К. Управление флотом и портами: Учебник для вузов. / Под ред. А.П. Ирхина. – М.: Транспорт, 1986. – 392 с.
10. Малышкин А.Г. Организация и планирование работы речного флота: Учебник для вузов. – М: Транспорт, 1985. – 215 с.
11. Никифоров, В.С. Оптимизация развития и размещения материально-технической базы обслуживания флота / В.С. Никифоров // Труды ГИИВТ. – 1991. – Вып. 252. – С. 3–20.
12. Справочник эксплуатационника речного транспорта / М.Д. Амосин [и др.] ; под ред. С.М. Пьяных. – М.:Транспорт, 1995. – 360 с.
13. Техническая эксплуатация речного флота : справочник / П.И. Бажан [и др.] ; под ред. А.Ф. Видецкого. – М.:Транспорт, 1995. – 320 с.
14. Цверов, В.В. Анализ и концепция формирования системы обеспечения предприятий речного транспорта материальными ресурсами в условиях рыночной экономики : монография / В.В. Цверов – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2008. – 191с.
15. Цверов, В.В. Логистические основы снабжения на речном транспорте: монография / В.В. Цверов. - : Изд-во «LAMBERTAcademicPublishing», 2016. – 276 с.
16. Абрамович, А.В. Организация и повышение эффективности работы бункеровочных компаний морского транспорта :дисс. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Абрамович Алина Владимировна. – Владивосток, 2007. – 160 с.

17. Крепак, С. В. Методические основы агентского обслуживания грузовых судов на внутреннем водном транспорте :дисс.... канд. техн. наук : 05.22.19 / Крепак Сергей Вячеславович. – Н.Новгород, 2000. – 207 с.
18. Радостина Е.А. Организационно-экономические аспекты повышения эффективности технического обслуживания флота на водном транспорте :дисс.... канд. эконом. наук : 08.00.05. / Радостина Екатерина Алексеевна. – Н.Новгород, 2011. – 155 с.
19. Самохина, Н.В. Повышение эффективности управления материальным обеспечением ремонтно-эксплуатационных предприятий водного транспорта :дисс.... канд. экон. наук : 08.00.05 / Самохина Наталья Владимировна. – Новосибирск, 2004. – 143 с.
20. Чернов, А.И. Исследование вопросов совершенствования расчетов по комплексному обслуживанию транзитного флота в портах :дисс.... канд. экон. наук : 08.00.05 / Чернов Александр Иванович. – Горький, 1975. – 166 с.
21. Власьев М.В. Выбор оптимального числа самоходных судов-бункеровщиков для доставки СПГ-топлива на суда в порту// Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2016. - № 44/45. - С. 26-31.
22. Марушенкова, С.В. Оценка влияния изменения оперативности снабжения сменно-запасными частями и навигационными материалами на эксплуатационные показатели работы речного транспорта / С.В. Марушенкова, В.В. Цверов // Международный научно-промышленный форум «Великие реки» 2014 г. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Интернет журнал широкой научной тематики. Выпуск 2014 г. http://вф-река-море.рф/2014/v2014_sek06.htm.
23. Цверов, В.В. Выявление теоретической связи влияния организации снабжения на эксплуатационные показатели работы флота/ В.В. Цверов, Е.Г. Бугрова // Конгресс Международного форума «Великие реки» 2018 г. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Интернет журнал широкой научной тематики. Выпуск 7, 2018 г. <http://вф-река-море.рф/2018/PDF/96.pdf>
24. Цверов, В.В. Моделирование сети баз снабжения организаций речного транспорта материалами, запчастями и оборудованием // В.В. Цверов, Н.Ф. Пермичев, С.И. Марушенкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. - №2 (32). – С. 15-19.
25. Цверов, В.В. Совершенствование системы снабжения предприятий материальными ресурсами на речном транспорте // В.В. Цверов, В.Я. Захаров, Д.В. Хавин, С.И. Марушенкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2009. - №4 (16). – С. 62-72.
26. Цверов, В.В. Оценка эффективности снабжения судоходных компаний материалами и запасными частями через сеть баз / В.В. Цверов, Е.Г. Бугрова // Конгресс Международного форума «Великие реки» 2017 г. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Интернет журнал широкой научной тематики. Выпуск 6, 2017 г. <http://вф-река-море.рф/2017/PDF/63.pdf>
27. Цверов, В.В. Оценка влияния организации снабжения на показатели работы флота / В.В. Цверов, Е.Г. Бугрова // Конгресс Международного форума «Великие реки» 2019 г. «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Интернет журнал широкой научной тематики. Выпуск 8, 2019 г. http://вф-река-море.рф/2019/PDF/11_33.pdf

References

1. Blinov Je.K., Dubershtejn A.M. Kompleksnoe obsluzhivanie sudov v morskikh portah [Complex service of vessels in sea ports]. M. : Transport, 1975. – 208 s.
2. Bruhis G.E., Lushhan N.A. Kommercheskaja ekspluatacija morskogo transporta [Commercial exploitation of sea transport]: ucheb. dlja sudovodit. spec. I ucheb. Posobie dlja ekspluat. spec. morehod. uch-shh. M.: Transport, 1985. – 264 s.
3. Gurvich G.E., Limonov Je.A. Kommercheskaja ekspluatacija morskogo sudna [Commercial operation of a marine vessel] : uchebnik. – M. : Transport, 1983. – 258 s.
4. Zaharov V.N., Kozhuhar', V.I.. Chernov. A.I. Issledovanie voprosov optimizaci i tehnologii kompleksnogo obsluzhivaniya transportnogo flota v portah [Research on optimization of integrated service technology for the transport fleet in ports] Trudy GIIVT. Gor'kij: GIIVT, 1974. – Vyp. 134. – S. 186–201.
5. Zaharov V.N., Cvetkov Je.S., Chernov A.I. Organizacija i upravlenie kompleksnym obsluzhivaniem flota v portah [Organization and management of complex fleet maintenance in ports] : ucheb. Posobie. Gor'kij: GIIVT, 1976. – 58 s.
6. Zaharov V.N., Zachesov V.P., Malyshkin A.G. Organizacija raboty rechnogo flota [organization of the river fleet]: uchebnik dlja vuzov. M. : Transport, 1994. – 287
7. Zin' Je.A., Ljahova K.S. Kompleksnoe obsluzhivanie flota [integrated fleet maintenance]. M. : Transport, 1974. – 232 s.
8. Zin' Je.A. Ekonomika i organizacija raboty rechnogo transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Economics and organization of river transport in Siberia and the Far East]. M. : Transport, 1979. – 112 s.
9. Irhin A.P., Suvorov V.S., Shhepetov V.K. Upravlenie flotom i portami: Uchebnikdljavuzov [Fleet and port management]. M.: Transport, 1986. – 392 s.
10. Malyshkin A.G. Organizacija i planirovanie raboty rečno goflota: Uchebnikdlja vu-zov [Organization and planning of the river fleet]. M: Transport, 1985. – 215 s.
11. Nikiforov, V.S. Optimizacija razvitija i razmeshhenija material'no-tehnicheskoy bazy obsluzhivaniya flota [Optimization of development and placement of the material and technical base of fleet maintenance]. Trudy GIIVT. Gor'kij: GIIVT, 1991. – Vyp. 252. – S. 3–20.

12. P'janyh S.M., Amusin M.D. Spravochnik ekspluatacionnika rechnogo transporta [Handbook of river transport operator]. M.:Transport, 1995. – 360 s.
13. Videckij A.F., Bazhan P.I. Tehnicheskaja ekspluatacija rechnogo flota :spravochnik [technical operation of the river fleet]. M.:Transport, 1995. – 320 s.
14. Tsverov, V.V. Analiz i koncepcija formirovanija sistemy obespechenija predpriyatij rechnogo transporta material'nymi resursami v uslovijah rynochnoj ekonomiki [Analysis and concept of forming a system for providing river transport enterprises with material resources in a market economy]. Monografija. N. Novgorod : Izd-vo FGOU VPO «VGAVT», 2008. – 191s.
15. Tsverov, V.V. Logisticheskie osnovy snabzhenija na rechnom transporte [Logistics bases of supply on river transport]. Monografija. Izd-vo «LAMBERTAcademicPublishing», 2016. – 276 s.
16. Abramovich, A.V. Organizacija i povyshenie effektivnosti raboty bunkerovochnyh kompanij morskogo transporta [Organization and improvement of efficiency of bunkering companies of sea transport]. Diss. ... kand. jekon. nauk. Vladivostok, 2007. – 160 s.
17. Krepak, S. V. Metodicheskie osnovy agentskogo obsluzhivaniya gruzovyh sudov na vnut-rennem vodnom transporte [Methodical bases of Agency service of cargo vessels on internal water transport]. Diss.... kand. tehn. nauk. N.Novgorod, 2000. – 207 s.
18. Radostina E.A. Organizacionno-ekonomicheskie aspekty povyshenija effektivnosti tehničeskogo obsluzhivaniya flota na vodnom transporte [Organizational and economic aspects of improving the efficiency of technical service of the fleet in water transport]. Diss.... kand. jekonom. Nauk. N.Novgorod, 2011. – 155 s.
19. Samohina N.V. Povyshenie effektivnosti upravlenija material'nym obespečeniem remontno-ekspluatacionnyh predpriyatij vodnogo transporta [Improving the efficiency of material support management for repair and maintenance enterprises of water transport]. Diss.... kand. jekon. nauk. Novosibirsk, 2004. – 143 s.
20. Chernov A.I. Issledovanie voprosov sovershenstvovanija raschetov po kompleksnomu obsluzhivaniju tranzitnogo flota v portah [Research on improving calculations for complex maintenance of the transit fleet in ports]. Diss.... kand. jekon. nauk. Gor'kij, 1975. – 166 s.
21. Vlas'ev M.V. Vybór optimal'nogo čisla samohodnyh sudov-bunkerovshhikov dlja dostavki SPG-topliva na suda v portu [Choosing the optimal number of self-propelled bunkering vessels for delivering LNG fuel to vessels in the port]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva, 2016. № 44/45. - S. 26-31.
22. Marushenkova S.V., Tsverov V.V. Ocenka vlijanija izmenenija operativnosti snabzhenija smenno-zapasnymi chastjami i navigacionnymi materialami na ekspluatacionnye pokazateli raboty rechnogo transporta [Assessment of the impact Of changes in the efficiency of supply of replacement spare parts and navigation materials on the operational performance of river transport]. Mezhdunarodnyj nauchno-promyshlennyj forum «Velikie reki» 2014 g. «Problemy ispol'zovanija i innovacionnogo razvitija vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Internet zhurnal širokojna-uchnoj tematiki. Vypusk 2014 g. http://vf-reka-more.rf/2014/v2014_sek06.htm.
23. Tsverov V.V., Bugrova E.G. Vyjavlenie teoreticheskoj svjazi vlijanija organizacii snabzhenija na eks-pluatacionnye pokazateli raboty flota [Identification of the theoretical relationship between the influence of the supply organization on the operational performance of the fleet]. Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki» 2018 g. «Problemy ispol'zovanija i innovacionnogo razvitija vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Internet zhurnal širokoj nauchnoj tematiki. Vypusk 7, 2018 g.<http://vf-reka-more.rf/2018/PDF/96.pdf>
24. Tsverov V.V., Permichev N.F., Marushenkova S.I. Modelirovanie seti baz snabzhenija organizacij rechnogo transporta materialami, zapchastjami i oborudovaniiem [Modeling of the network of bases for supplying river transport organizations with materials, spare parts and equipment]. Vestnik transporta Povolzh'ja, 2012. №2 (32). – S. 15-19.
25. Tsverov V.V., Zaharov V.Ja., Havin D.V., Marushenkova S.I. Sovershenstvovanie sistemy snabzhenija predpriyatij material'nymi resursami na rechnom transporte [Improving the system of supply of enterprises with material resources on river transport]. Vestnik transporta Povolzh'ja, 2009. №4 (16). – S. 62-72.
26. Tsverov V.V., Bugrova E.G. Ocenka effektivnosti snabzhenija sudohodnyh kompanij materialami i zapasnymi chastjami cherez set' baz [Evaluation of the efficiency of supplying shipping companies with materials and spare parts through a network of bases]. Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki» 2017 g. «Problemy ispol'zovanija i innovacionnogo razvitija vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Internet zhurnal širokoj nauchnoj tematiki. Vypusk 6, 2017 g. <http://vf-reka-more.rf/2017/PDF/63.pdf>
27. Tsverov V.V., Bugrova E.G. Ocenka vlijanija organizacii snabzhenija na pokazateli raboty flota [Evaluation of the impact of the supply organization on the performance of the fleet]. Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki» 2019 g. «Problemy ispol'zovanija i innovacionnogo razvitija vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Internet zhurnal širokoj nauchnoj tematiki. Vypusk 8, 2019 g. http://vf-reka-more.rf/2019/PDF/11_33.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Викторович Цверов, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 600950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Vladimir V. Tsverov, Dr. Sci. (Econ), associate Professor, Department of logistics and marketing, Volga state University of water transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 600950, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Екатерина Геннадьевна Бугрова, магистр, менеджер Водоходъ, 125040, Москва, Скаковая улица, дом 17, строение 1, подъезд 4, офис 1103. e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Ekaterina G. Bugrova, master's degree, Manager of Vodohod, 17 Skakovaya street, building 1, entrance 4, office 1103, Moscow, 125040. e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Владимир Николаевич Костров, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 600950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Vladimir N. Kostrov, Dr. Sci. (Econ), Professor, head of the Department of logistics and marketing, Volga state University of water transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 600950, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Дмитрий Александрович Коршунов, кандидат экономических наук, доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 600950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

Dmitry A. Korshunov, Ph.D. (Econ), associate Professor of the Department of logistics and marketing, Volga state University of water transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 600950, e-mail: kafedra-lim@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 519.876.5+621.397.132

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.029

Применение киберфизических систем для обучения технике безопасности персонала морского бортового тренажёра

Д.А. Татаренков¹, Г.Г. Рогозинский^{1,2}, И.Г. Малыгин^{2,3}, А.В. Богданов^{3,4}

¹Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.П. Бонч-Бруевича, ²Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ³Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, ⁴Государственный Эрмитаж

Аннотация. В данной статье представлена улучшенная технология обучения персонала морских судов. Одной из особенностей этой технологии является применение виртуальной реальности для моделирования рабочего пространства персонала и нештатных ситуаций на рабочих местах. Рассматриваемая технология может быть использована для создания тренажеров морских судов с применением киберфизических систем. Отработка техники безопасности на море в безопасной среде возможна благодаря комбинированию методов рендеринга виртуального рабочего пространства и частичного воспроизведения элементов управления судна в виде интерфейсов взаимодействия обучаемого со средой виртуальной реальности тренажёра. Моделирование непредвиденных обстоятельств - простой и эффективный метод тренировки, когда у члена экипажа есть определенный запас времени. Для формирования пространства в виртуальной среде, как правило, используется метод трёхмерного моделирования объектов, что требует предварительные обмеры реальных объектов, создание технических чертежей. Этот процесс занимает большое количество времени и требует высококвалифицированный персонал для обработки материала и воссоздания помещений и предметов в виде 3D-моделей. Основная цель этой статьи - представить прототип технологии, с помощью которой можно синтезировать дополнительные ракурсы в виртуальной среде на основе реальных изображений и их карт глубины, что значительно сокращает время разработки модели корабля для создания его симулятора.

Ключевые слова: киберфизическая система, морской тренажёр, обучение, виртуальный ракурс, карта глубины, виртуальная реальность.

Application of cyber-physical systems for safety training of personnel of the marine on-board simulator

Dmitriy A. Tatarenkov¹, Gleb G. Rogozinsky^{1,2}, Igor G. Malygin^{2,3}, Alexey V. Bogdanov^{3,4}

¹The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, ²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, ³St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, ⁴State Hermitage

Abstract. This article presents an improved process for training ship personnel. One of the features of this process is the use of virtual reality to simulate the workspace of personnel and emergency situations at workplaces. The process in question can be used to create simulators for sea vessels using cyber-physical systems. Practicing safety at sea in a safe environment is possible due to the combination of methods for rendering a virtual workspace and partial implementation of ship controls in the form of interfaces for interaction of a trainee with the virtual reality environment of the simulator. Simulation of contingencies is a simple and effective training method when the crew member has a certain amount of time. To form space in a virtual environment, as a rule, the method of three-dimensional modeling of facilities is used, which requires making preliminary measurements of real facilities, creating technical drawings. This process takes a lot of time and requires highly qualified personnel to process the material and recreate the premises and objects in the form of 3D models. The main goal of this article is to show a prototype of the process that can be used to synthesize additional perspectives in a virtual environment based on real images and their depth maps, which significantly reduces a development time for a ship model to create its simulator.

Keywords: cyber physical system, marine simulator, training, virtual perspective, depth map, virtual reality.

Введение

Виртуальная реальность (VR) определяется как иммерсивная интерактивная система, основанная на информационных вычислениях [1]. Виртуальная реальность как интерактивная технология предлагает учебным центрам возможность подготавливать будущих специалистов в условиях иммерсивного обучения. Согласно Goldman Sachs [2], передача знаний является крупнейшей сферой бизнеса для технологий дополненной и виртуальной реальности. Моделирование и виртуальная реальность используются при обучении в ситуациях, которые не должны возникать, а также в опасных ситуациях с учетом навыков обучаемого. Интеграция

вычислительных ресурсов в физические сущности, выполненные в виде элементов управления, датчиков положения объектов внутри отслеживаемой сцены, позволяет в полной мере реализовать концепцию киберфизических систем. По данным M. Rall и соавторов [3], анализ действий обучаемого – самая важная часть при работе на реальном симуляторе для успешного процесса обучения, обеспечивающая обратную связь для виртуальной системы при обучении. Однако, несмотря на прогнозируемые и ожидаемые результаты VR и AR на мировых рынках, образование в настоящее время занимает наименьшую долю рынка, что указывает на

потенциальный рост, который может иметь данный сектор (рис. 1).

Что касается поведения персонала, исследования показывают, что 49% организаций с эффективной культурой использования подобных технологий менее подвержены несчастным случаям, а сотрудники 60% организаций совершают меньше ошибок на рабочем месте. Непрерывные и непредвиденные инциденты на море создают необходимость в улучшении подходов к безопасности, выходя за рамки традиционного мышления, способов и практики. В настоящее время безопасность является приоритетом для судоводных компаний. Использование тренажеров - эффективный вклад в формирование культуры безопасности в судоводном секторе. Сегодняшний сектор хорошо подходит для проектирования и особенно обучения на основе моделирования [5].

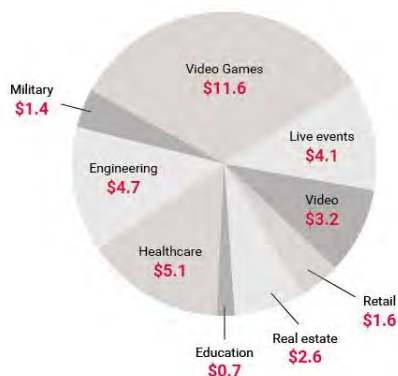


Рис. 1. Прогноз рынка дополненной и виртуальной реальности на 2025 в миллиардах долларов США [4].

Синтез виртуального ракурса - ключевая технология для отображения 3D-видео в очках VR или в дополненной и смешанной реальности. Синтез виртуального ракурса обозначает использование двух или более имеющихся изображений с камер, установленных в определенных точках, для получения (синтеза) различных изображений сцены с других точек обзора. В настоящее время алгоритмы визуализации виртуальных ракурсов в основном включают два метода: визуализацию на основе моделей (MBR) и визуализацию на основе изображений (IBR) [6].

Визуализация на основе карты глубины (DIBR)

Добавляя информацию о глубине в IBR, DIBR значительно снижает требования к количеству исходных представлений и экономит место для хранения и пропускную способность, что вызвало в последние годы определенный интерес у исследователей [7]. Вариант алгоритма DIBR основывается на преобразовании перспективы изображения [8]. В этом случае необходимо совместить проекции в мировых координатах. Виртуальный ракурс синтезируется из текстуры и соответствующей карты глубины. Сначала координаты точки на исходном изображении проецируются в мировые координаты с использованием соответствующих значений глубины. После этого промежуточные точки в пространстве проецируются на плоскость изображения виртуальной камеры, которая находится в желаемой позиции просмотра. Этот

процесс называется деформированием трехмерного изображения.

На рисунке 2 показан процесс переноса точки. Произвольная точка M в трехмерном пространстве проецируется под реальным углом в точку m и под синтезированным углом в точку m'. Таким образом точка m левого ракурса переносится через плоскость π в соответствующее место координат точки m' на виртуальном ракурсе, где эпиполярная линия через точку m' получается путём соединения m' и эпиполярной e'. При условии, что мировая система координат виртуальной камеры совмещена с системой координат камеры-источника, уравнения для перспективной проекции дают:

$$\tilde{m} \cong A \cdot P_n \cdot \tilde{M} \quad (1)$$

$$\tilde{m} \cong A' \cdot P_n \cdot D \cdot \tilde{M} \quad (2)$$

где матрица D 4x4 содержит матрицу поворота R и матрицу переноса T, которая преобразует трехмерные координаты точки из мировой системы координат в систему координат виртуальной камеры l'; матрицы A и A' имеют размер 3x3 и определяют внутренние параметры камер соответственно; P_n - это матрица 3x4, которая представляет собой так называемую нормализованную матрицу перспективной проекции.

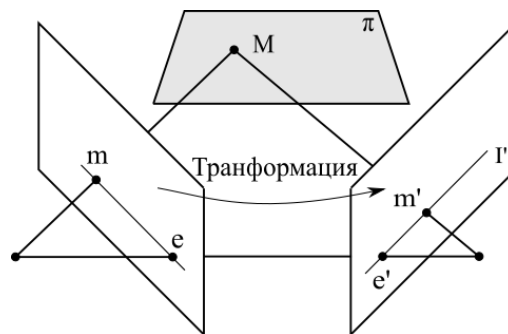


Рис. 2. Точка m левой плоскости перенесена через плоскость π в точку m' на виртуальном виде (правой плоскости)

После определения аффинного преобразования M в трехмерных координатах, которое зависит от его значения глубины Z, и преобразования уравнений (1) и (2), формируется уравнение аффинного несоответствия, которое представляет зависимость от значения глубины между соответствующими точками в двух перспективных проекциях одной 3D-сцены:

$$Z' \cdot \tilde{m}' = Z \cdot A' \cdot R \cdot A^{-1} \cdot m + A' \cdot T \quad (3)$$

Следует обратить внимание, что одни и те же типы изображений 3D-объекта, полученные под углом, но с разными методами съемки (параллельные или сходящиеся оси), не отличаются друг от друга при углах менее 5° [6]. Таким образом, возможно создание виртуального вида без использования перспективных преобразований. В экспериментальной работе предлагается использовать расчет новых координат методом сдвига на величину диспаратности (disparity), т.е. так называемому дифференциальному параллаксу, определяющему восприятие объёма и глубины

изображения на основе бинакулярности зрения. Примем

$$Z = Z_f + v \left(\frac{Z_n - Z_f}{255} \right) \quad (4)$$

где Z_f - расстояние до дальней плоскости, Z_n - расстояние до ближней плоскости, v - уровень серого, который определяется 8 битами информации, $v \in [0..255]$. Таким образом, самый дальний пиксель должен быть близок к уровню черного (0), а ближайший объект должен быть белым (255). Затем новые координаты пикселя могут быть рассчитаны по формуле:

$$(x', y') = (x + \Delta x, y) \quad (5)$$

где x' и y' - координаты пикселя виртуального изображения, Δx - значение диспаратности для данного пикселя, получаемое по следующей формуле:

$$\Delta x = \frac{Z - \Delta x_0}{255 / (\Delta x_{max} - \Delta x_{min})} \quad (6)$$

где Δx_0 - нулевой параллакс, соответствующий виртуальному изображению при стереосмотре ракурсов:

$$\Delta x_0 = \frac{255}{2} + (\Delta x_{max} + \Delta x_{min}) \frac{255}{2(\Delta x_{max} - \Delta x_{min})} \quad (7)$$

где Δx_{max} - значение максимальной положительной диспаратности, Δx_{min} - значение максимальной отрицательной диспаратности.

Особо внимание следует обратить на предотвращение наложения дальних пикселей на

ближние. Для это предлагается построить карту глубины для виртуального изображения и выполнить проверку записанных значений при назначении цвета пикселя.



Рис. 3. Синтезированный вид с «трещинами» и «пустотами».

Однако, наиболее существенная проблема с DIBR заключается в том, как бороться с так называемыми пустотами, которые образуются на синтезированных изображениях (рис. 3). Основная причина их появления - окклюзия, когда два объекта находятся примерно на одной линии, и объект, расположенный ближе к виртуальной камере или окну просмотра, частично или полностью закрывает видимость другого объекта. В последние годы было предложено множество алгоритмов для решения этих проблем.



Рис. 4. Карта глубины (слева), исходный вид (в центре), синтезированный вид (справа).

Часто используется метод борьбы с пустотами на сформированном ракурсе изображения, предложенный в статьях [9–11], где предлагается подвергать карту глубины предварительной обработке для уменьшения размера «трещин».

Экспериментальные результаты показывают, что такая предварительная обработка может в некоторой степени исправить ошибки исходной карты глубины и уменьшить количество пустот в реконструированном изображении. Однако традиционный предварительный фильтр может размыть карту глубины как «пустот», «трещин» так и областей без

них. Кроме того, такое сглаживание также может вызывать геометрические искажения и появление текстурных артефактов.

Авторы предложили метод заполнения пустот на основе информации с исходной точки обзора. Кроме того, учитывается степень различия значений глубины между соседними пикселями. Для этого карта глубины обрабатывается с помощью сверточного фильтра [1,0], который позволяет определить границы, а затем оценивается значимость найденных ребер. Результат работы алгоритма представлен на рисунке 4.

Таблица 1.

Результаты сравнения DIBR-методов при помощи метрик похожести

Метрика подобия	Авторский метод	Fehn cropped	Fehn Interpolated	ICIP TMM	ICME	Незаполненные области
PSNR	33.32	32.11	36.92	30.97	30.97	36.57
MSE	554.76	646.63	532.70	1015.26	1015.67	536.20
SSIM	0.91	0.66	0.90	0.60	0.60	0.87
IW-SSIM	0.89	0.5874	0.9617	0.50	0.51	0.88

Для сравнений результатов работы предложенного авторами алгоритма выбраны наиболее часто используемые методы получения дополнительных ракурсов. Fehn C. и соавторы предлагают предварительную обработку карты глубины для устранения разрывов (Fehn stopped), граница обрезается, а размер изображения изменяется до исходного [8]. В другой реализации метода автора Fehn C. изображение глубины предварительно обрабатывается для устранения разрывов, но границы не обрезаются (Fehn Interpolated). Метод ICIP TMM использует информацию о межкадровом изменении карты глубины [12]. Метод ICME применяет предварительно синтезированные текстуры (патчи) для заполнения пустот на виртуальных ракурсах [13].

Таблица 1 показывает, что синтезированные ракурсы, полученные с помощью предложенного авторами метода, имеют хорошие показатели сходства с реальными ракурсами в соответствии с такими показателями, как структурное сходство (SSIM) и SSIM-мера, взвешенная по содержанию информации (IW-SSIM) [14].

Заключение

От точности позиционирования полученных ракурсов в мировых координатах зависит степень иммерсивности системы в целом, поэтому так важно качественно совмещать синтезированные ракурсы с элементами киберфизических систем в сознании обучаемого. Способ закрашивания пустот в новом ракурсе зависит от величины перепада уровня глубины. Соответственно, выбор оптимального уровня минимального порога является целью дальнейших исследований. Рендеринг на основе изображения глубины можно использовать для создания морского симулятора VR. Этот метод не требует сложного 3D моделирования. Карту глубины можно получить с помощью таких устройств, как Intel RealSense, Microsoft Kinect и других времяпролетных (Time of Flight, сокр. TOF) устройств. Кроме того, карта глубины может быть создана из стереопары цветных изображений. Предложенный перечень средств позволяет с минимальными трудозатратами и в короткие сроки создавать киберфизические системы, способные эмулировать полный цикл подготовки персонала морских судов.

Литература

14. Heim M, Virtual Reality, Oxford University Press, New York, 1998
15. Golman Sachs. Virtual & Augmented Reality Understanding the race for the next computing platform, 13 January 2016. URL: <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/technology-driving-innovation-folder/virtual-and-augmented-reality/report.pdf>
16. Rall M, Manser T, Howard S: Key elements of debriefing for simulator training. European Journal of Anaesthesiology, Vol. 17, 2000; pp. 516–517
17. Sergio Cobos. AR/VR innovations in surgery and healthcare. 14 August 2017. URL: <https://3dcoil.grupopremo.com/blog/arvr-innovations-surgery-healthcare/>
18. Markopoulos, Evangelos & Lauronen, Jenny & Luimula, Mika & Lehto, Pihla & Laukkanen, Sami. (2019). Maritime Safety Education with VR Technology (MarSEVR).
19. Merkle P, Morvan Y, Smolic A (2009) The effects of multi-view depth video compression on multi-view rendering. signal processing-image communication 24(1–2):73–88
20. Hannuksela MM, Rusanovskyy D, Su W, Chen L, Li R, Aflaki P, Lan D, Joachimiak M, Li H, Gabbouj M (2013) Multi-view-video-plus-depth coding based on the advanced video coding standard. IEEE Trans Image Process 22(9):3449–3458
21. Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV / ed. Woods A.J. et al. San Jose, CA, 2004. P. 93–104.
22. Liu W. et al. An enhanced depth map based rendering method with directional depth filter and image inpainting // Vis Comput. 2016. Vol. 32, № 5. P. 579–589.
23. Park Y.K. et al. Depth-image-based rendering for 3DTV service over T-DMB // Signal Processing: Image Communication. 2009. Vol. 24, № 1–2. P. 122–136.
24. Wan-Yu Chen et al. Efficient Depth Image Based Rendering with Edge Dependent Depth Filter and Interpolation // 2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Amsterdam, The Netherlands: IEEE, 2005. P. 1314–1317.
25. M. Köppel, P. Ndjiki-Nya, D. Doshkov, H. Lakshman, P. Merkle, K. Müller, and T. Wiegand, "Temporally consistent handling of disocclusions with texture synthesis for depthimage-based rendering," in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP), Hong Kong, China, pp. 1809–1812, Sep. 2010.
26. P. Ndjiki-Nya, M. Koppel, D. Doshkov, H. Lakshman, P. Merkle, K. Muller, and T. Wiegand, "Depth image based rendering with advanced texture synthesis," in Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia Expo, pp. 424-429, Jul. 2010
27. Z. Wang and Q. Li, "Information Content Weighting for Perceptual Image Quality Assessment," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 20, no. 5, pp. 1185-1198, May 2011

References

1. Heim M, Virtual Reality, Oxford University Press, New York, 1998
2. Golman Sachs. Virtual & Augmented Reality Understanding the race for the next computing platform, 13 January 2016. URL: <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/technology-driving-innovation-folder/virtual-and-augmented-reality/report.pdf>
3. Rall M, Manser T, Howard S: Key elements of debriefing for simulator training. European Journal of Anaesthesiology, Vol. 17, 2000; pp. 516–517
4. Sergio Cobos. AR/VR innovations in surgery and healthcare. 14 August 2017. URL: <https://3dcoil.grupopremo.com/blog/arvr-innovations-surgery-healthcare/>

5. Markopoulos, Evangelos & Lauronen, Jenny & Luimula, Mika & Lehto, Pihla & Laukkanen, Sami. (2019). Maritime Safety Education with VR Technology (MarSEVR).
6. Merkle P, Morvan Y, Smolic A (2009) The effects of multi-view depth video compression on multi-view rendering. *signal processing-image communication* 24(1–2):73–88
7. Hannuksela MM, Rusanovsky D, Su W, Chen L, Li R, Aflaki P, Lan D, Joachimiak M, Li H, Gabbouj M (2013) Multi-view-video-plus-depth coding based on the advanced video coding standard. *IEEE Trans Image Process* 22(9):3449–3458
8. Fehn C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV / ed. Woods A.J. et al. San Jose, CA, 2004. P. 93–104.
9. Liu W. et al. An enhanced depth map based rendering method with directional depth filter and image inpainting // *Vis Comput.* 2016. Vol. 32, № 5. P. 579–589.
10. Park Y.K. et al. Depth-image-based rendering for 3DTV service over T-DMB // *Signal Processing: Image Communication.* 2009. Vol. 24, № 1–2. P. 122–136.
11. Wan-Yu Chen et al. Efficient Depth Image Based Rendering with Edge Dependent Depth Filter and Interpolation // 2005 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Amsterdam, The Netherlands: IEEE, 2005. P. 1314–1317.
12. M. Köppel, P. Ndjiki-Nya, D. Doshkov, H. Lakshman, P. Merkle, K. Müller, and T. Wiegand, “Temporally consistent handling of disocclusions with texture synthesis for depthimage-based rendering,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP)*, Hong Kong, China, pp. 1809–1812, Sep. 2010.
13. P. Ndjiki-Nya, M. Koppel, D. Doshkov, H. Lakshman, P. Merkle, K. Muller, and T. Wiegand, “Depth image based rendering with advanced texture synthesis,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Multimedia Expo*, pp. 424–429, Jul. 2010
14. Z. Wang and Q. Li, “Information Content Weighting for Perceptual Image Quality Assessment,” in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 5, pp. 1185–1198, May 2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Александрович Татаренков, старший преподаватель кафедры телевидения и метрологии С.-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: dtatarenkov@outlook.com

Dmitriy A. Tatarenkov, senior lecturer, Television and Metrology Dept., The Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshevikov Pt., St. Petesburg, 193232, Russian Federation, e-mail: dtatarenkov@outlook.com

Глеб Гендрихович Рогозинский, кандидат технических наук, начальник НОЦ «Медиацентр» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; старший научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

Gleb G. Rogozinsky, Ph.D. (Eng), Head of Medialabs, The Bonch-Bruevich St.Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshevikov Pt., St. Petesburg, 193232, Russian Federation; senior researcher, Laboratory of Transportation Ecology, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: malygin_com@mail.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation. e-mail: malygin_com@mail.ru

Алексей Валентинович Богданов, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора ФГБУК «Государственный Эрмитаж», 190000, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 34, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: bogdanov@hermitage.ru

Alexey V. Bogdanov, Ph.D. (Eng), Deputy Head of the State Hermitage Museum, 34, Dvortsovaya, St. Petersburg, 190000, Russian Federation, associate Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation. e-mail: bogdanov@hermitage.ru

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 621.9:658.512

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.030

Создание автоматизированных рабочих мест на основе формализованной методики проектирования технологических процессов машиностроительных предприятий

Г.С. Жетесова¹, Т.Ю. Никонова¹, В.В. Юрченко¹, А.К. Матешов¹, Н.А. Савельева¹

¹Карагандинский технический университет

Аннотация. В статье рассматривается проблема создания автоматизированных систем, удовлетворяющих требованиям современного производства (универсальность, многофункциональность и комплексность), прежде всего, должны быть созданы специальные методология и теория, раскрывающие процессы проектирования, представляемые в математическом, формализованном и программном виде. Авторами предлагается формализация процесса проектирования и технологии, на основе которой создана система автоматизации проектирования, что позволит проектировать технологические процессы ТП для разнообразных изделий, в том числе ранее не производившихся. Разработка математических моделей ТП механической обработки деталей обеспечит объективное принятие технологических решений и будет отражать динамику качественного и количественного преобразования заготовок в процессе производства. Практической значимостью работы является создание и апробация ПО «Система автоматизированных рабочих мест машиностроительных предприятий», в которой разработаны АРМ технологических служб и подразделений, а именно АРМ отдела технолога. Для реализации цели, разработанный АРМ обеспечивает выполнение двух основных направлений деятельности. Во-первых, обеспечивает возможность разработки и внедрения ТП, средств автоматизации и механизации, оптимизации режимов работы универсального оборудования, и оборудования с числовым программным управлением. Во-вторых, реализует своевременную разработку технических заданий для обеспечения структурных подразделений (цехов, участков) специальной оснасткой, инструментом и приспособлениями, предусмотренными технологией, нестандартным оборудованием средствами автоматизации и механизации.

В результате проведенных исследований, получены:

1. Методика проектирования основных этапов ТП изготовления деталей, основанная на объективных критериях выбора технологических параметров, что обеспечит исключение ошибок на начальном этапе. Разработан общий алгоритм решения технологической задачи.
2. Методика назначения переходов и составления планов обработки, в основу которой положен принцип выполнимости определенным методом текущего перехода, а именно, выполнение характеристик.
3. Методика оснащения ТП позволяет учитывать геометрические и точностные параметры, дополнительные требования к поверхности на конкретных стадиях с учетом текущей производственной ситуации.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, технологический процесс, математическое моделирование, автоматизированное рабочее место.

Creation of automated workplaces based on a formalized methodology for designing technological processes of machine-building enterprises

Gulnara S.Zhetessova¹, Tatyana Yu. Nikonova¹, Vasily V. Yurchenko¹, Arman K. Mateshov¹, Nadezhda A. Savelyeva¹

¹Karaganda technical university

Abstract. The problem of development special software for the automation for design of technological processes that meets the requirements of modern production – universality, multifunctionality and complexity are considered. The authors propose – CAD is developed, which will make it possible to design technological processes for a wide variety of products, including new ones that have not previously entered production.

The practical significance of the work is the creation and testing of the software «System of automated workstations of machine-building enterprises», in AWP of the technologist's department, were developed. The first direction provides the possibility of developing and implementing processes. The second the timely development of technical specifications for the provision of structural units (workshops and sections) with special equipment, tools and devices provided for by technology.

As a result of the research, the methods of designing technological processes for machining parts were obtained:

1. Methodology for designing the main stages based on objective criteria for the selection of technological parameters, which ensures the elimination of errors at the initial stage of the technological process formation
2. The method of assigning transitions and drawing up processing plans, based on the principle of the feasibility of the current transition by a certain method, namely, the fulfillment of the characteristics that need to be obtained at the current transition.
3. The technique of equipping the technological process allows taking into account the geometric and precision parameters, additional requirements for the surface at specific stages based on the current production situation.

Key words: computer-aided design system, technological process, mathematical modeling, automated workplace.

Введение

В настоящее время имеющиеся в СНГ автоматизированные системы технологической подготовки не решают проблемы автоматизации проектирования технологических задач и не могут быть использованы для проектирования технологии изготовления новых изделий. Основным недостатком существующих автоматизированных систем состоит в том, что при их работе приходится анализировать и корректировать результаты проектирования технологических процессов в соответствии с конкретным масштабом производства. Кроме того, из-за разомкнутого алгоритма принятия проектных решений они не позволяют проектировать сквозную технологию изготовления изделия, включающую заготовительные, контрольные операции, механическую обработку, термообработку и т.д. Сложившаяся ситуация в значительной мере связана с отсутствием методологии и теории автоматизации проектирования и прикладной теории автоматизации проектирования технологии [1,2].

Для создания автоматизированных систем, удовлетворяющих требованиям современного производства (универсальность, многофункциональность и комплексность), прежде всего, должны быть созданы специальные методология и теория, раскрывающие процессы проектирования, представляемые в математическом, формализованном и программном виде. Методология и теория должны быть общими в том смысле, что построенная с их помощью методика проектирования должна учитывать любые производственные структуры, различные экономические требования и в то же время опираться на законы изготовления деталей и изделий машиностроения; должны описывать сложную взаимосвязь факторов изготовления с факторами производства, управления и экономики [3-6].

Формализация процесса проектирования и технологии, на основе которой будет создана система автоматизации проектирования, даст возможность проектирования технологических процессов для самых разнообразных изделий, в том числе новых, ранее не поступавших в производство. Разработка математических моделей технологического процесса механической обработки деталей обеспечит объективное принятие технологических решений и будет отражать динамику качественного и количественного преобразования заготовок в процессе производства.

Таким образом, создание системы автоматизации технологической подготовки производства, объединяющей различные по характеру и содержанию задачи технологии машиностроения является актуальной задачей, решение которой, прежде всего, заключается в создании автоматизированных рабочих мест ключевых должностей любого машиностроительного предприятия.

Организационно создание автоматизированных рабочих мест (АРМ) предприятия реализуется через создание отдельных автоматизированных рабочих мест специалистов, состав которых зависит от структуры предприятия и соответствует комплексу решаемых задач. Автоматизированное рабочее место (АРМ) – это рабочее место специалиста, оснащенное персональным компьютером,

программным обеспечением и совокупностью информационных ресурсов индивидуального или коллективного пользования, которые позволяют ему вести обработку данных с целью получения информации, обеспечивающей поддержку принимаемых им решений при выполнении профессиональных функций [7-10]. Отдел, оснащенный совокупностью АРМ работников этой службы, становится автоматизированным подразделением. В нем значительная часть рутинной работы по переработке информации выполняется разрабатываемым программным обеспечением [5].

1. Методика исследований

Для построения математического описания процесса проектирования технологии рассмотрены три основных множества этого процесса: множество поверхностей детали А, множество оборудования С и множество размерных связей R, которые определены при математическом моделировании [12]. В отличие от указанных множеств рассмотрим множества, связанные с инструментом, приспособлением, процессом базирования, формированием технологических переходов и операций, где количество данных увеличено в несколько раз. Для математического описания весь процесс проектирования разобьем на единичные составляющие, которые связаны между собой формулами. Такое математическое моделирование позволит объективно описать не только расчетные задачи, но и логические, что в существующих математических моделях ранее сделать было нельзя. В частности подробно рассмотрим свойства предметов для элементов множества поверхностей – вид поверхностей, соотношение поверхностей с другими поверхностями (открытые поверхности, закрытые, полузакрытые с указанием направления закрытости поверхность закрыта в положительном направлении и т. п.), а также свойство – иметь координирующий размер, качество поверхности (точность, шероховатость); для элементов множества для оборудования – вид оборудования, допустимые на данном оборудовании методы обработки, достигаемое качество обработки (точность, шероховатость); для элементов множества для размеров – направление размера (параллельность какой-либо координатной оси), вид размера (линейный, диаметральный и т.п.), количественные характеристики размера (номинал, допуск, посадка).

Ниже приведены математические модели для различных этапов проектирования технологических процессов [13].

Формирование множества технологических цепей Cvari:

$$Nci: Npi \cap Sti \times Nsi \cap Npi \cap Nkbi \cap Nbvubi \cap NITi \cap Nzi \cap NvarITi \rightarrow Cvari \quad (1)$$

где Nsi – множество способов обработки;
 Npi – множество планов обработки;
 Nkbi – множество комплектов баз;
 Nci – номер цепи;
 Nbvubi – множество базовых поверхностей;
 Npi – номер поверхности;
 NITi – качество базовой поверхности;

Nzi – значение точности;
 Sti – статус поверхности;
 NvariTi – множество значений точности от которых возможна обработка конкретной поверхности с заданной точностью;

Формирование множества методов обработки Mi на основе схем базирования BSMi:

$$BSMi \times Si \cap ITmini \cup ITmaxi \rightarrow Mi, \quad (2)$$

где Si – схема базирования;
 ITmini – квалитет минимальный;
 ITmaxi – квалитет максимальный.
 Формирование – множества видов базовых поверхностей BPVBi:

$$Ni \times Nbvubi \rightarrow BPVBi, \quad (3)$$

где Ni – номер поверхности.
 Описание направления поверхности относительно базы BNPi:

$$Nbasei \times Napravlentiei \cup NPi \rightarrow BNPi, \quad (4)$$

где Nbasei – номер базы
 Napravlentiei – направление;
 NPi – обрабатываемая (необрабатываемая) поверхность.

Формирование вариантов закрепления с помощью базовых поверхностей BMRi:

$$Npovi \times Nvari \cap VBi \cap (Xmovei \cup Ymovei \cup Zmovei) \cap (Xrotatei \cup Yrotatei \cup Zrotatei) \cap SSi \rightarrow BNRi, \quad (5)$$

где Nvari – номер варианта базирования;
 Npovi – номер поверхности;
 SSi – степени свободы.
 Получение вариантов комплекта баз Nvbki:

$$Nbvubi \times NvarKi \cup Npovi \rightarrow Nvbki, \quad (6)$$

где NvarKi – номер варианта комплекта;
 Npovi – номер поверхности.
 Получение множества методов обработки различных поверхностей PMI:

$$TPi \cup VPi \times MOi \cup Pi \rightarrow PMi, \quad (7)$$

где MOi – наименование методов обработки;
 Pi – описание методов обработки.
 Описание множества существующих планов обработки PPi:

$$TPi \cup VPi \times Ni \cup MOi \cup ITi \cup li \rightarrow PPi, \quad (8)$$

где Ni – номер плана обработки;
 ITi – точность обработки;
 li – использовать существующий план обработки.
 Получение множества оптимизированных цепей OCi:

$$Nobrabpovi \cap ITpovi \times Nplani \cup Nkomplektai \cup Nbasei \cup ITbasei \cap ITKOi \cap Gotovai \rightarrow OCi, \quad (9)$$

где Nplani – номер плана обработки;
 Nkomplektai – номер комплекта баз;
 Nbasei – номер базы;

Nobrabpovi – номер обрабатываемой поверхности;
 ITbasei – точность базовой поверхности;
 ITpovi – точность поверхности;
 ITKOi – точность конечной обработки;
 Gotovai – корректная цепь;

Формирование множества операций OTPi по используемым приспособлениям:

$$POi \times Ni \cup Oi \rightarrow OTPi, \quad (10)$$

где OTPi – множество операций;
 Ni – номер операции;
 Oi – наименование операции;
 POi – обозначение приспособления;
 Формирование множества выбранных инструментов VII:

$$IOi \times Ni \cup Oi \rightarrow VII, \quad (11)$$

где Ni – номер перехода;
 Pi – наименование перехода;
 IOi – обозначение инструмента.
 Формирование множества технологических процессов TPi:

$$Npovi \cup Noperi \cup Oi \cap ROi \cup VOi \cup NOi \cup DOi \cup Ti \cup Ipi \cup Si \cup Ni \cup Vi \cup Toi \times Ncechi \cup Nuchastoki \cup Modeli \cup Nperechi \cup U Perehodi \cup Prispoblenie \cup POi \cup PrispGOSTi \cup U li \cup IRi \cup IOi \cup MMi \cup InstrGOSTi \cup TPi, \quad (11)$$

где Ncechi – номер цеха;
 Nuchastoki – номер участка;
 Noperi – номер операции;
 Modeli – модель станка;
 Nperechi – номер перехода;
 Perehodi – наименование перехода;
 Npovi – номер поверхности;
 Prispoblenie – наименование приспособления;
 Oi – наименование операции;
 POi – обозначение приспособления;
 PrispGOSTi – стандарт приспособления;
 li – название инструмента;
 IRi – размер инструмента;
 IOi – обозначение инструмента (номер);
 MMi – марка режущего клина;
 InstrGOSTi – стандарт инструмента;
 ROi – размер обработки;
 VOi – верхнее отклонение;
 NOi – нижнее отклонение;
 DOi – длина обработки;
 Ti – глубина резания;
 Ipi – количество проходов;
 Si – подача;
 Ni – мощность резания;
 Vi – скорость резания;
 Toi – основное время.
 Описание множества размеров заготовки ZRi:

$$NPi \times ROi \cup RZi \cup PDi \cup Ki \cup VOi \cup NOi \cup Rzi \rightarrow ZRi, \quad (12)$$

где NPi – номер поверхности;
 ROi – обозначение размера;
 RZi – значение размера;
 PDi – поле допуска;
 Ki – квалитет;

VOi – верхнее отклонение;
 NOi – нижнее отклонение;
 Rzi – шероховатость.

Структура методики проектирования ТП представлена на рисунке 1, а также в виде графа на рисунке 2. В основу методики положен принцип выполнимости данным методом текущего перехода, а именно, выполнение характеристик, которые необходимо получить на данном (текущем) переходе. При этом, применяя данный метод необходимо снять припуск, который складывается из характеристик предыдущего и данного метода обработки. Здесь так же учитывается, что данный припуск можно снять за несколько переходов, устанавливая различную глубину резания согласно технологическим условиям обработки [13].

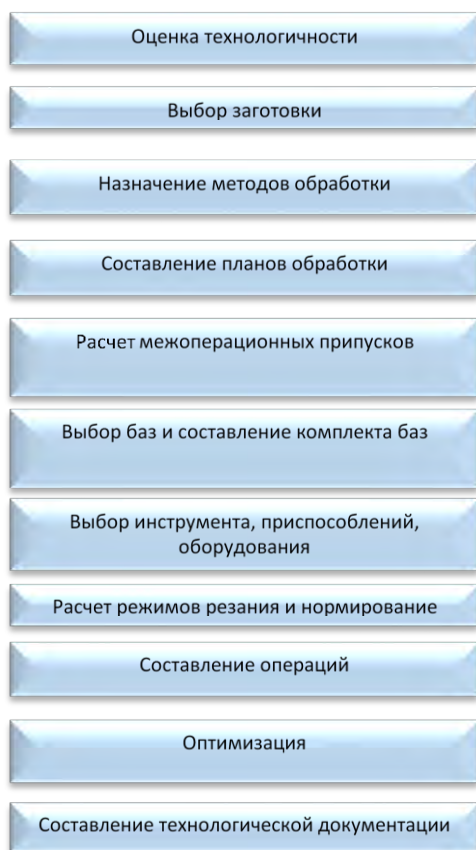


Рис. 1. Структура системы

В характеристики методов обработки включаются следующие элементы: размеры обрабатываемой поверхности, качество, достигаемый данным методом, шероховатость, точность и значения пространственных отклонений поверхности, точность и значения пространственных отклонений расположения поверхности, глубина дефектного слоя, а также глубина резания, которую можно установить для снятия припуска.

Все эти характеристики соответствуют максимальным значениям точности (минимальным значениям погрешности), которые можно получить применяя данный инструмент, оборудование, режимы резания. Такое описание делается с целью получения максимального возможного количества вариантов планов обработки с последующей их

корректировкой на этапах выбора инструмента, приспособления, оборудования. При этом будут пересчитаны припуски на обработку и назначена глубина резания в соответствии с конкретными характеристиками инструмента, приспособления, оборудования [14].

Использование методов обработки, характеристики которых содержат максимальную точность обработки, объясняется тем, что обрабатывая поверхность заготовки одним и тем же методом обработки, можно применять инструмент различной конструкции, то есть можно получить в итоге различную точность обработки, шероховатость, глубину дефектного слоя. Привязка характеристик методов обработки к характеристикам конкретного инструмента приведет к значительному и неоправданному увеличению объема информации. Данное положение относится и к остальным элементам ТП (приспособлениям, станкам). Использование конкретных характеристик элементов ТП невозможно еще и потому, что на данном этапе неизвестны базы, комплекты баз для обработки конкретных поверхностей, так как вид базы, ее точность и ее роль в комплекте баз используется для выбора инструмента, приспособления, станка.

Если составлять множество вариантов, содержащих характеристики конкретных элементов ТП, а критериями будут служить составленные в последствии комплекты баз, то это тоже приведет к большому увеличению информации, так как характеристики элементов ТП содержат множество своей информации. Таким образом, выбор баз и составление комплекта баз необходимо производить после составления планов обработки.

Такая методика используется для того, чтобы организовать поток данных, при этом отсеять те методы обработки, которые нельзя применить в данных условиях обработки. Организация потока данных, а именно, составление планов обработки и разбиение его на стадии обработки, необходима для задачи подготовки баз [15].

Название стадии обработки здесь является чисто условной и соответствует не собственно стадии обработки, а конкретному качеству перехода. Название принято для более полного понимания процесса проектирования, который применяется в ручном режиме, то есть оно является чисто психологическим. Постановка стадии обработки в соответствии конкретному качеству обработки сделана потому, что неизвестно на каком именно качестве (переходе) следует повышать качество базовой поверхности для обработки конкретной поверхности.

Согласно такому подходу, названий обдирочная, черновая, чистовая, отделочная обработка не будет, а будет название стадия восьмого качества. К тому же это будет соответствовать разбиению на стадии для немеханических операций стадия термической обработки, где стадия соответствует конкретному методу обработки. Разбиение на стадии, применяемое при ручном проектировании, используется для облегчения восприятия процесса проектирования и не отражает объективные технологические процессы, то есть носит субъективный характер [16].

В виду того, что обрабатываемые поверхности содержат несколько размеров и эти размеры лежат в

плоскостях, в которых находятся погрешности поверхностей, которые необходимо исправить соответствующим методом обработки, то характеристики этих методов будут делиться на характеристики, соответствующие обработке размеров в конкретной плоскости.

Для определения качества перехода в плане обработки используется математическая модель, отображающая процесс механической обработки, а именно повышение качества обработки. Данная модель основывается на утверждении, что при черновой обработке повышение качества происходит на 3, 4 единицы, полустивовой – 1, 2 единицы, чистовой – 1 единица, отделочной – 0 единиц. Но так как для выбора метода по глубине резания рассчитывается припуск на обработку по методике, в которой расчет ведется от размеров детали, то математическая модель поиска качества обработки будет основываться не на уточнении (повышении) качества, а на огрублении, то есть направление расчета обработки будет вестись от поверхности детали.

В итоге система выдает максимальное количество возможных вариантов планов обработки, отсортированных по повышению точности обработки. Для составления максимального числа вариантов используется граф, представленный на рисунке 2.

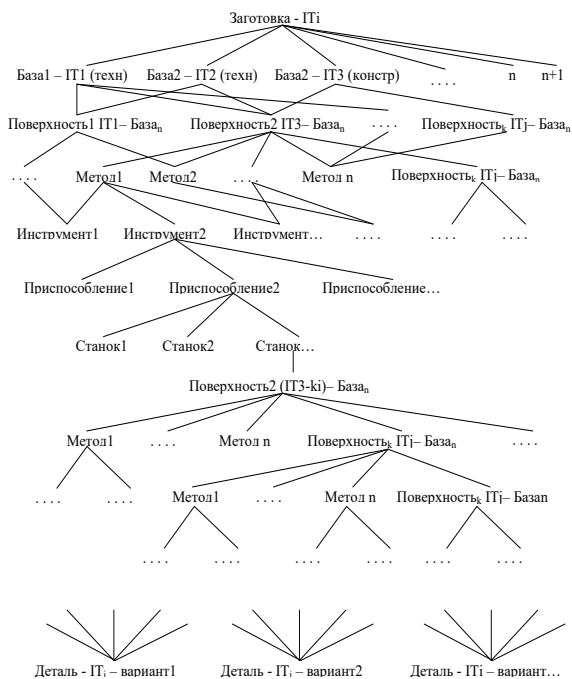


Рис.2 Граф составления вариантов планов обработки

Для реализации автоматизированной системы проектирования технологической подготовки производства было создано программное обеспечение, которое ставит главной своей целью разработку автоматизированного рабочего места инженера-технолога на машиностроительном предприятии.

Разработанный АРМ обеспечивает выполнение двух основных направлений деятельности [17, 18].

Первое направление обеспечивает возможность разработки и внедрения технологических процессов,

средств автоматизации и механизации, оптимизация режимов работы универсального оборудования, и оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), используемого на производстве.

Второе направление реализует своевременную разработку технических заданий для обеспечения структурных подразделений (цехов и участков) специальной оснасткой, инструментом и приспособлениями, предусмотренными технологией, нестандартным оборудованием, средствами автоматизации и механизации.

Технолог имеет возможность вносить или корректировать информацию в процессе разработки технологических процессов при технологической подготовке производства [20]. На рисунке 3 представлено окно ввода параметров детали.

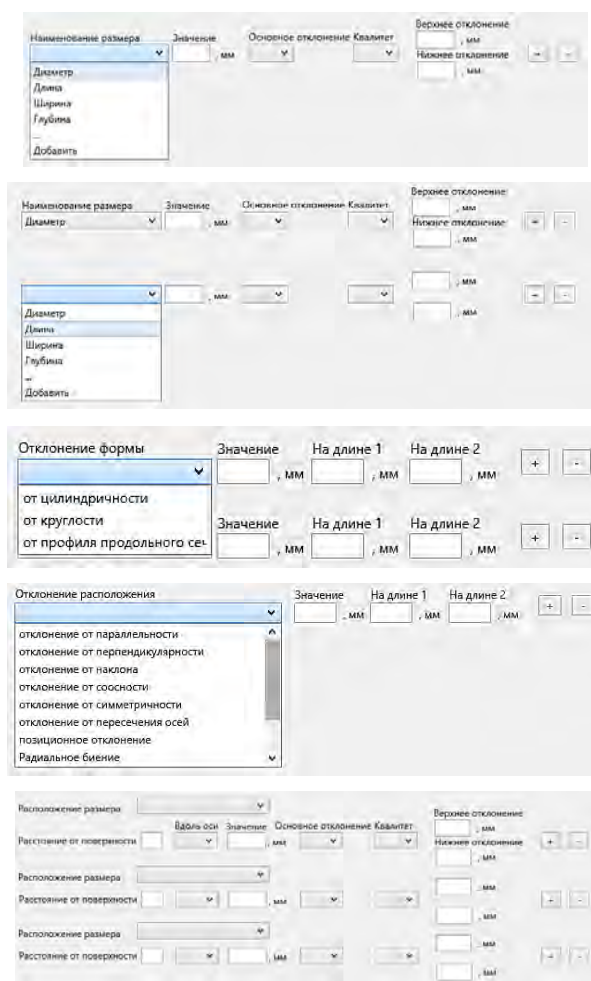


Рис.3. Формы для внесения информации о параметрах детали

Информация о детали разделена на информацию:

- графическую;
- о материале;
- о твердости;
- о технических требованиях;
- о геометрии поверхностей;
- о размерах поверхностей;
- о точности формы поверхностей;
- о координации поверхности в пространстве и относительно поверхностей заготовки
- о точности расположения.

В ходе проектирования возможны два варианта составления планов обработки поверхности. Первый вариант подразумевает их автоматический подбор с предоставлением выбора технологом оптимального варианта. Технологию предоставляют после автоматического расчета различные варианты способов обработки заготовки до состояния детали. Все параметры предлагаемых вариантов планов получают расчетным путем. Технолог может выбирать окончательный вариант на основе своего опыта. При этом предоставляется возможность корректировки полученных вариантов. Но технолог может оставить выбор окончательного варианта планов обработки за программой.

Второй вариант выбора планов обработки подразумевает предварительный их выбор и расчет параметров вне программы. Таким образом, информация о планах обработки должна вноситься если их расчет не производится в самой программе.

Для удобства внесения параметров детали технолог может открыть чертеж детали в данной программе, но вносить данные необходимо вручную, данные с чертежа детали программой не считываются.

В процессе внесения информации технолог вносит данные о материале детали, ее твердости и состоянии поверхностного слоя. Затем выбирает по графическому изображению поверхность детали с указанием ее номера. Деталь разбивается на элементарные поверхности, начиная с левого торца или стороны при ее расположении как на конструкторском чертеже, при этом нумерации одновременно подвергаются все поверхности без разделения их на различные виды и типы. Графическому изображению соответствует определенный тип и вид поверхности – цилиндрическая, внутренняя или наружная и т.д. Затем вносятся размерные характеристики поверхности, собственно размеры через параметры и их значения, их точность – качество и основное отклонение, либо сразу верхнее и нижнее отклонение, а также шероховатость поверхности. При указании на чертеже детали общих требований к поверхностям, а именно точности размера и шероховатости, эти параметры и их значения должны быть указаны для каждой поверхности. Если в базе данных программы отсутствует необходимая поверхность, технолог может ее добавить в соответствующие таблицы без изменения программного кода.

Для того, чтобы в одном окне можно было вносить параметры и их значения для различного типа и вида поверхности, меню сделано динамическим. Это обеспечивает использование в программном обеспечении всего одного окна. Исходя из этого структура программного обеспечения упрощается, и не требуется дополнительной корректировки программного кода.

Затем указываются точности форм в продольном и поперечном направлении, их наименование, степень точности и значение, программное обеспечение имеет внутреннюю информацию в виде баз данных, поэтому табличные данные могут вводиться автоматически в внесении определяющих данных, то есть указывая степень точности для определенных уже размеров и видов отклонений, значения этих отклонений выводятся автоматически.

Также по внесенным значениям точности будет определена ближайшая степень точности.

Для координации поверхности вносится ее ориентирование по отношению к координатным осям и плоскостям. Также вносится информация о координирующих размерах – их значения, точности, расположении относительно координатной системы. Координатная система определяется заранее и ориентируется в соответствии с технологическими предпочтениями. При внесении расстояний, ориентирующих текущую поверхность необходимо обращать внимание на то обстоятельство, что собственные размеры имеют только поверхности фасонной формы, так же, как и цилиндрические поверхности, плоские же поверхности имеют размеры, являющиеся одновременно координирующими расстояниями. Необходимо также внести информацию о погрешностях расположения.

Информация о дополнительных требованиях к детали вносится в соответствующие поля и учитывается при назначении стадий и методов обработки, расчете режимов резания, нормирования и т.д. [16].

На рисунке 4 представлено окно ввода параметров заготовки. Программа работает в двух языковых режимах (английский и русский).



Рис. 4. Окно внесения параметров заготовки

Информация о заготовке разделена на информацию:

- графическую;
- о материале;
- о способе изготовления;
- о геометрии поверхностей;
- о размерах поверхностей;
- о точности формы поверхностей;
- о координации поверхности в пространстве и относительно поверхностей заготовки
- о точности расположения.

В ходе проектирования возможны два варианта выбора заготовки. Первый вариант подразумевает ее автоматический выбор с предоставлением выбора технологом оптимального способа ее получения. Технологию предоставляют после автоматического расчета различные варианты способов получения заготовки для текущей детали. Все параметры предлагаемых заготовок получены расчетным путем, также предоставляются предварительный экономический расчет стоимости по массе заготовок. Технолог может выбирать окончательный вариант на основе своего опыта. При

регистрации программы для ЭВМ «Система автоматизированных рабочих мест машиностроительных предприятий» №2020618585 от 30 июля 2020г. Российской Федерации Данное

программное обеспечение успешно прошло апробацию и адаптацию за рубежом, что подтверждается полученными актами внедрения [20].

Литература

1. Tarakhovsky A. Yu., Babikov I. I. Features of the implementation of Cals-technologies in the educational process for the preparation of bachelors in the direction of training 03/15/05 "Design and technological support engineering industries". Science, engineering and technology in the context of globalization: paradigmatic characteristics and problems of integration, Prague, October 28-29, 2017. - pp. 33 - 35
2. Hamed Tabkhia Robert, Busheyb Gunar Schirner Conceptual Abstraction Levels (CALs) for managing design complexity of market-oriented MPSoCs. Microprocessors and Microsystems Volume 39, Issue 8, November 2015. - P. 704-719, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.07.016>
3. Kolmykova ON Life cycle of Cals - technologies Bulletin of Tambov University. Series: Humanities, 3 (59), 2008. - pp. 38-40
4. Жетесова Г.С., Юрченко В.В., Никонова Т.Ю., Жаркевич О.М., Моделина Е.Д. Особенности базирования при управлении точностью системы станок-приспособление-инструмент-деталь. // Технология машиностроения. – Москва, 2020. - №1. – С. 34-43
5. Cherkasov M.N., Sharenkov S. B. Application of foreign techniques to assess the effectiveness of using CAD systems in innovative projects of Russian industry. Problems of Economics and Management, No. 2, 2014. -p.34-38.
6. Жетесова Г.С., Юрченко В.В., Никонова Т.Ю., Кожанов М.Г., Иванов С.С., Кибек А.С. Исследование и анализ САПР ТП машиностроительного производства. // Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Под редакцией Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2018. С. 40-49.
7. Никонова Т.Ю., Жунуспеков Д.С., Абдрахманова К.М. Разработка единой системы подготовки производства при выпуске инновационной продукции в условиях Карагандинского литейно-механического завода ТОО «Maker». Техника и технологии машиностроения: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 22–25 мая 2019 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ ;– Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019.– С. 44-48
8. Kadzhametova T.N., Asanova A. Sh. Methods for calculating depreciation on fixed assets in accounting Tavricheskiy scientific observer, No. 5 (10), 2016. - С.102-105, www.tavr.science
9. Zhetessova G., Aizhambaeva S., Nikonova T., Vavilova G., Belik M. Modeling Arc Spraying Process for Eccentric Sleeve of Cone Crusher GP 500 Using Computer-Aided Design / Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 970, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.970.343 © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland – pp 343-355.
10. Жетесова Г.С., Юрченко В.В., Савельева Н.А. Необходимость создания автоматизированных систем управления технологической подготовки производства на машиностроительных предприятиях РК / Труды Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 11), 14-15 июня 2019 г. В 5-и частях. Часть 1/ Министерство образования и науки РК, Карагандинский государственный технический университет. - Караганда: Изд-во КарГТУ, 2019. –С.215-217
11. Жетесова Г.С., Никонова Т.Ю., Юрченко В.В., Моделина Е.Д. Анализ теории проектирования технологических процессов механической обработки / Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XVII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады 04-05 апреля 2019 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 337-340.
12. Altunin K.A., Sokolov M.V. Development of Information Support for Intelligent CAD of Cutting Processes. Advanced Materials & Technologies, No. 2, 2017. - P.67 - 77 [https:// DOI: 10/17277 / amt.2017.02](https://doi.org/10.17277/amt.2017.02). - pp.067-077
13. Zhetessova G.S., Yurchenko V.V., Nikonova T.Yu., Zharkevich O.M., Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N. Systems of automated design for parts and technological processes in mechanical engineering: monograph. – SPb.: POLYTECH-PRESS, 2019. – с.106.
14. Aliyev Kh.R. Combined model for assessing the complexity of software development SPbSPU Scientific and Technical Bulletin Economic Sciences, No. 3, 2010. - P. 201-208
15. Жетесова Г.С., Жаркевич О.М., Матешов А.К. Применение математических моделей при обеспечении технологичности конструкций горных машин. - Болгария, Международная научно-практическая конференция «Бъдъщите Изследвания», 15-22 февраля 2018, С. 3-6.
16. Жетесова Г.С., Юрченко В.В., Никонова Т.Ю. и др. Экспериментальные исследования применения методики казахстанской системы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления деталей горных машин и разработка рекомендаций / Г.С. Жетесова, В.В. Юрченко, Т.Ю. Никонова, О.М. Жаркевич, А.К. Матешов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №2. – С. 46-55. DOI: 10.24892/RIJIE/20180207.
17. G S Zhetessova, V V Yurchenko, T Yu Nikonova, O M Zharkevich and N A Savelyeva. - Environmental management in automated systems for engineering production. - 7th International Conference on Actual Problems in Machine Building P Conf. Series: Materials Science and Engineering 843 (2020) 012005 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/843/1/012005
18. Zhetessova G., Yurchenko V., Nikonova T., Zharkevich O. The development of the computer-aided design system for production processes of component part machining for single-piece production and repair conditions. Journal of Applied Engineering Science Vol. 17, No. 4, 2019 ISSN 1451-4117. doi:10.5937/jaes17-21470. – pp 123-133.

19. G. S. Zhetessova, V. V. Yurchenko, T. Yu. Nikonova, O. M. Zharkevich, I. N. Khrustaleva, Ya. Yu. Brovkina, A. V. Boykov / Computer Aided Design Systems for Solving Problems in Mechanical Engineering – SPb. : POLYTECH-PRESS, 2020. – p.100.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Система автоматизированных рабочих мест машиностроительных предприятий» №2020618585 от 30 июля 2020г. – Российская Федерация.

References

1. Tarakhovsky A. Yu., Babikov I. I. Features of the implementation of Cals-technologies in the educational process for the preparation of bachelors in the direction of training 03/15/05 "Design and technological support engineering industries". Science, engineering and technology in the context of globalization: paradigmatic characteristics and problems of integration, Prague, October 28-29, 2017. - pp. 33-35
2. Hamed Tabkhia Robert, Busheyb Gunar Schirner Conceptual Abstraction Levels (CALs) for managing design complexity of market-oriented MPSoCs. Microprocessors and Microsystems Volume 39, Issue 8, November 2015. - pp. 704-719, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.07.016>
3. Kolmykova ON Life cycle of Cals - technologies Bulletin of Tambov University. Series: Humanities, 3 (59), 2008. - pp. 38 - 40
4. Zhetesova G.S., Yurchenko V.V., Nikonova T.Yu., Zharkevich O.M., Modelina E.D. Features of basing when controlling the accuracy of the machine-fixture-tool-detail system. Mechanical engineering technology. - Moscow, 2020. - №1. - pp. 34-43
5. Cherkasov M.N., Sharenkov S. B. Application of foreign techniques to assess the effectiveness of using CAD systems in innovative projects of Russian industry. Problems of Economics and Management, No.2, 2014. -pp. 34-38
6. Zhetesova G.S., Yurchenko V.V., Nikonova T.Yu., Kozhanov M.G., Ivanov S.S., Kibeko A.S. Research and analysis of CAD TP of mechanical engineering production. Collection of scientific papers of the II International Scientific and Practical Conference. Edited by L.A. Potapova, A. Yu. Drakina. 2018. - pp. 40-49.
7. Nikonova T.Yu., Zhunuspekov D.S., Abdрахmanova K.M. Development of a unified pre-production system for the release of innovative products in the conditions of the Karaganda foundry-mechanical plant LLP "Maker". Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the VIII Intern. scientific and technical conf. (Omsk, May 22-25, 2019). Ministry of Education and Science of Russia, OmSTU; - Omsk: Publishing house of OmSTU, 2019.- pp. 44-48
8. Kadzhametova T.N., Asanova A. Sh. Methods for calculating depreciation on fixed assets in accounting Tavrisheskiy scientific observer, No. 5 (10), 2016. - pp.102-105, www.tavr.science
9. Zhetessova G., Aizhambaeva S., Nikonova T., Vavilova G., Belik M. Modeling Arc Spraying Process for Eccentric Sleeve of Cone Crusher GP 500 Using Computer-Aided Design. Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 970, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.970.343 © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland - pp 343-355.
10. Zhetesova G.S., Yurchenko V.V., Savelyeva N.A. The need to create automated control systems for technological preparation of production at machine-building enterprises of the Republic of Kazakhstan. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Integration of Science, Education and Production - the Basis for the Implementation of the Plan of the Nation" (Saginovsky Readings No. 11), June 14-15, 2019. parts. Part 1. Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Karaganda State Technical University. - Karaganda: Publishing house of KSTU, 2019. - pp. 215-217
11. Zhetesova G.S., Nikonova T.Yu., Yurchenko V.V., Modelina E.D. Analysis of the theory of designing technological processes of mechanical processing. Technological equipment for the mining and oil and gas industry: a collection of works of the XVII international scientific and technical conference "Readings in memory of V. R. Kubachek", held in the framework of the Ural mining decade April 04-05, 2019. Under total ... ed. Lagunova Yu.A. Organizing Committee: Yu.A. Lagunova, A.E. Kalyanov. - Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2019. - pp. 337-340.
12. Altunin K.A., Sokolov M.V. Development of Information Support for Intelligent CAD of Cutting Processes. Advanced Materials & Technologies, No. 2, 2017. - P.67 – 77. doi:10/17277/amt.2017.02. - pp. 067-077
13. Zhetessova G.S., Yurchenko V.V., Nikonova T.Yu., Zharkevich O.M., Lyubomudrov S.A., Khrustaleva I.N. Systems of automated design for parts and technological processes in mechanical engineering: monograph. - SPb.: POLYTECH-PRESS, 2019.- 106 p.
14. Aliyev Kh.R. Combined model for assessing the complexity of software development SPbSPU Scientific and Technical Bulletin Economic Sciences, No. 3, 2010. - pp. 201-208
15. Zhetesova G.S., Zharkevich O.M., Mateshov A.K. Application of mathematical models to ensure the manufacturability of mining machine designs. - Bulgaria, International Scientific and Practical Conference "Observe Research", February 15-22, 2018, pp. 3-6.
16. Zhetesova G.S., Yurchenko V.V., Nikonova T.Yu. Experimental studies of the application of the methodology of the Kazakh system of computer aided design of technological processes for the manufacture of parts for mining machines and the development of recommendations. Zhetesov, V.V. Yurchenko, T. Yu. Nikonova, O. M. Zharkevich, A.K. Mateshov. Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal. - 2018. - T.6, No. 2. - pp. 46-55. doi:10.24892/RIJIE/20180207.
17. G S Zhetessova, V V Yurchenko, T Yu Nikonova, O M Zharkevich and N A Savelyeva. - Environmental management in automated systems for engineering production. - 7th International Conference on Actual Problems in Machine Building P Conf. Series: Materials Science and Engineering 843 (2020) 012005 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/843/1/012005

18. Zhetessova G., Yurchenko V., Nikonova T., Zharkevich O. The development of the computer-aided design system for production processes of component part machining for single-piece production and repair conditions. Journal of Applied Engineering Science Vol. 17, No. 4, 2019 ISSN 1451-4117. doi:10.5937/jaes17-21470. - pp 123-133.
19. G. S. Zhetessova, V. V. Yurchenko, T. Yu. Nikonova, O. M. Zharkevich, I. N. Khrustaleva, Ya. Yu. Brovkina, A. V. Boykov. Computer Aided Design Systems for Solving Problems in Mechanical Engineering - SPb.: POLYTECH-PRESS, 2020. - 100 p.
20. Certificate of state registration of the computer program "System of automated workstations of machine-building enterprises" No. 2020618585 dated July 30, 2020. - Russian Federation

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гульнара Сантаевна Жетесова, доктор технических наук, профессор, первый проректор Карагандинского технического университета, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: zhetessova@mail.ru

Татьяна Юрьевна Никонова, кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности доцента кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: nitka82@list.ru

Василий Викторович Юрченко, доктор PhD, заведующий кафедрой технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский технический университет, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: juvv76@mail.ru

Арман Кариевич Матешов, докторант PhD, старший преподаватель кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский технический университет Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: makashka_m@mail.ru

Надежда Александровна Савельева, докторант кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский технический университет Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: n.a.savelyeva@gmail.com

Gulnara S. Zhetessova, Dr. Sci. (Eng), Professor, First Vice-Rector of Karaganda Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, N. Nazarbayev Ave., 56, e-mail: zhetessova@mail.ru

Tatyana Yu. Nikonova, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Acting Associate Professor of the Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Karaganda State Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: nitka82@list.ru

Vasily V. Yurchenko, Ph.D. (Eng), Head of the Department of Technological Equipment, Engineering and Standardization, Karaganda Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: juvv76@mail.ru

Arman K. Mateshov, graduate student, Senior Lecturer, Department of Technological Equipment, Engineering and Standardization, Karaganda Technical University of Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: makashka_m@mail.ru

Nadezhda A. Savelyeva, graduate student of the department technological equipment, mechanical engineering and standardization, Karaganda Technical University of Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: n.a.savelyeva@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

УДК 004.896

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.031

Формы мышления автономных интеллектуальных агентов:
особенности и проблемы их организацииВ.Б. Мелехин¹, М.В. Хачумов^{2,3}¹Дагестанский государственный технический институт,²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской Академии наук³Российский университет дружбы народов

Аннотация. Обосновано, что по аналогии с живыми организмами, для решения в проблемной среде различных по сложности задач, автономных интеллектуальных агентов различного назначения целесообразно наделять тремя дополняющими друг друга следующими формами мышления: наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления. Определено функциональное назначение каждого отмеченного выше вида мышления. В частности показано, что наглядно-действенное мышление позволяет автономным интеллектуальным агентам эффективным образом целенаправленно функционировать и изучать закономерности преобразования текущей ситуации априори неописанной проблемной среды. Инструментальные средства наглядно-образного мышления предназначены для вывода решений в процессе планирования поведения связанного с целенаправленным преобразованием текущей ситуации проблемной среды на основе заданной модели представления знаний и процедур вывода решений. Понятийное мышление служит для пополнения недостающих знаний в процессе планирования поведения в недоопределенных условиях функционирования и для решения сложных задач поведения, требующих смены ситуаций проблемной среды для достижения заданной цели. Обозначены основные подходы, особенности и проблемы связанные с организацией инструментальных средств вывода решений в процессе планирования поведения автономных интеллектуальных агентов на основе рассмотренных видов мышления.

Ключевые слова; автономный интеллектуальный агент, планирование поведения, наглядно-действенное мышление, наглядно-образное мышление, понятийное мышление, модель представления знаний.

Forms of thinking of autonomous intelligent agents:
Features and problems of their organizationVladimir B. Melekhin¹, Mikhail V. Khachumov^{2,3}¹Dagestan State Technical Institute, Russian Federation²Federal Research Center "Computer Science and Control"
Russian Academy of Sciences, Russian Federation³Peoples' Friendship University of Russia, Russian Federation

Abstract It is substantiated that, by analogy with living organisms, in order to solve in a problem environment of various complexity tasks of autonomous intelligent agents for various purposes, it is advisable to endow with three complementary forms of thinking: visual-effective, visual-figurative and conceptual thinking. The functional purpose of each type of thinking noted above has been determined. In particular, it is shown that visual-active thinking allows autonomous intellectual agents to function efficiently and purposefully and study the laws of transformation of the current situation of an a priori undescribed problem environment. Visual-figurative thinking tools are designed to output decisions in the process of planning behavior associated with a targeted transformation of the current situation of the problem environment based on a given knowledge representation model and decision inference procedures. Conceptual thinking serves to replenish the missing knowledge in the process of planning behavior in underdetermined conditions of functioning and to solve complex problems of behavior that require a change in situations of the problem environment to achieve a given goal. The main approaches, features and problems associated with the organization of tools for deriving solutions in the process of planning the behavior of autonomous intelligent agents based on the considered types of thinking are outlined.

Keywords: autonomous intelligent agent, behavior planning, visual-active thinking, visual-figurative thinking, conceptual thinking, knowledge representation model.

Введение

Одной из актуальных проблем искусственного интеллекта является разработка эффективных процедур планирования целенаправленного поведения автономных интеллектуальных агентов (АИА) в различных условиях функционирования. По аналогии с живыми организмами [1 - 3], для успешного решения различных по сложности задач в реальных условиях проблемной среды (ПС), автономных интеллектуальных агентов, обладающих техническим зрением и развитой моторной системой,

целесообразно наделять возможностями следующих взаимосвязанных и дополняющих друг друга типов мышления: наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления. Необходимость разработки инструментальных средств наглядно-действенного мышления обусловлено тем, что на практике часто требуется создание АИА различного назначения способных эффективным образом целенаправленно функционировать в априори неописанных условиях ПС [4, 5]. Другими словами, наглядно-действенное мышление позволяет АИА изучать закономерности

целенаправленного преобразования различных ситуаций ПС в априори неописанных условиях функционирования.

Инструментальные средства наглядно-образного мышления предназначены для вывода решений в процессе планирования поведения связанного с целенаправленным преобразованием текущей ситуации ПС на основе заданной модели представления знаний и процедур вывода решений. Понятийное мышление служит для пополнения недостающих знаний в процессе планирования поведения в недоопределенных условиях функционирования и для решения сложных задач поведения, требующих смены ситуаций ПС для достижения заданной цели.

Особенности и проблемы организации различных форм мышления автономных интеллектуальных агентов

В общем случае, как отмечено выше, для выполнения сложных заданий в различных условиях проблемной среды АИА следует наделять возможностями наглядно-действенного, наглядно-образного и понятийного мышления.

Наглядно-действенное мышление АИА. Данный вид мышления обеспечивает АИА возможность адаптироваться к априори неописанным условиям ПС путем выявления в процессе самообучения закономерностей преобразования ее ситуаций и формирования на этой основе условных программ целесообразного поведения [6 - 8]. Наглядно-действенное мышление предназначено для планирования целесообразного поведения на участке ПС расположенном в пределах разрешающей способности технического зрения и позволяет АИА организовать в условиях неопределенности следующие виды целенаправленной деятельности:

- мотивационное поведение с характерным для него автоматическим целеполаганием. Иначе говоря, данный вид поведения связан с необходимостью достижения целей автоматически формулируемых в решателе задач АИА в ответ на появление в ПС определенного вида сигналов, например, связанных с возникновением в среде различных угроз безопасной деятельности;

- целесообразное поведение, которое сводится к изучению закономерностей преобразования текущей ситуации ПС обеспечивающих достижение в ней заданной цели.

В общем случае мотивационное и целесообразное поведение на основе мыслительных актов наглядно-действенного мышления можно организовать следующим образом [9]:

1) АИА формирует формальное описание текущей ситуации ПС S_T в виде графа видимости представляющего собой нечеткую семантическую сеть [10] и имитирует, используя данную модель в процессе самообучения, отработку пробных действий;

2) согласно принятому критерию отбора, интеллектуальный агент на основе метода проб и ошибок, выявляет полезные с точки зрения достижения заданной цели действия b_k без их непосредственной отработки на каждом шаге самообучения. Это позволяет АИА сформировать

условную программу целесообразной деятельности, состоящую из элементарных актов поведения, например, имеющих следующую структуру

$$a_i \& b_k \rightarrow a_j.$$

Каждый такой акт поведения $a_i \& b_k \rightarrow a_j$ означает, что если АИА воспринимает в текущей ситуации ПС условный сигнал a_i , то в результате отработки им действия b_k в среде появляется условный сигнал a_j ;

3) процесс самообучения продолжается до закрепления в формируемой условной программе следующего элементарного акта поведения $a_i \& b_k \rightarrow c_h$, где c_h – заданный АИА безусловный сигнал, появление которого в текущих условиях ПС, вызывает у него ответные безусловные реакции B_h , приводящие к достижению соответствующей им цели поведения c_h^* ;

4) формируемые таким образом условные программы целесообразной деятельности запоминаются и используются в качестве накопленного опыта поведения в различных условиях функционирования, аналогичных условиям, изученным в процессе самообучения.

В общем случае, модель представления знаний, необходимых АИА для организации рассмотренных выше процедур наглядно-действенного мышления, включает:

– формальное описание текущей ситуации ПС S_T в виде нечеткой семантической сети S_T^* , которая соответствует участку среды расположенному в пределах разрешающей способности технического зрения АИА.

– структурированное описание обрабатываемых АИА действий $b_k \in B$, каждое из которых включает подситуацию S_{II}^k характеризующую условия, в которых возможна успешная отработка соответствующего действия b_k и подситуацию S_P^k , отражающую результаты, получаемые в текущих условиях функционирования после его отработки. Данные типовые элементы представления знаний определяются элементарными актами поведения следующего вида $S_{II}^k \& b_k \rightarrow S_P^k$.

Каждый элементарный акт поведения $S_{II}^k \& b_k \rightarrow S_P^k$ означает, что если нечеткая семантическая подсеть S_{II}^k является, нечетко вложено равной [10] в формальное описание текущей ситуации ПС S_T^* , то отработка АИА действия b_k позволяет выполнить ее преобразование в ситуацию S_T^{**} , в формальное описание которой становится нечетко вложено равной нечеткая семантическая подсеть S_P^k ;

– безусловные реакции АИА определяемые в следующем виде $c_h \rightarrow B_h$, действия которых $B_h \subset B$ отрабатываются интеллектуальным агентом в ответ на появление в ПС соответствующего безусловного сигнала c_h . Каждый такой безусловный сигнал определяется в виде нечеткой семантической сети C_h^* .

Приведенные выше типовые структуры, входящие в модель представления знаний позволяют АИА имитировать отработку пробных действий $b_k \in B$ в процессе самообучения в текущих условиях ПС следующим образом.

1. После построения формального описания текущей ситуации ПС S_T , АИА приступает к изучению закономерностей ее преобразования с целью появления в ней заданного на текущий момент времени безусловного сигнала c_h .

2. АИА на текущем шаге самообучения выбирает случайным образом пробные действия b_k согласно равномерному закону распределения вероятностей их отработки.

3. Для каждого выбранного таким образом действия b_k проверяется условие нечеткого вложения подситуации S_P^k в текущую ситуацию ПС S_T : если условие выполняется, то осуществляется переход к п. 4; в противном случае, действие b_k исключается из числа результативных действий на текущем шаге самообучения и осуществляется переход к п. 2.

4. Элементарный акт поведения $S_{II}^k \& b_k \rightarrow S_P^k$ запоминается в формируемой программе условного поведения. Данный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выявлен и сохранен в формируемой условной программе следующий элементарный акт поведения $S_{II}^k \& b_k^* \rightarrow c_h$.

Наглядно-образное мышление АИА. Процедуры вывода, строящиеся на основе инструментальных средств наглядно-образного мышления, предусматривают наличие у АИА заданной модели представления знаний, отражающей закономерности преобразования различных ситуаций ПС. Данная модель может быть представлена как безотносительно к конкретной предметной области в виде, например, активной нечеткой семантической сети [10], так и привязанной и отражающей закономерности преобразования определенных условий ПС [11]. Наличие такой модели позволяет АИА, в соответствии с видом представления ее и заданной цели, организовать планирование целенаправленного поведения либо в пространстве состояний, либо в пространстве подзадач путем автоматической генерации соответствующего дерева вывода решений [12].

Планирование поведения в пространстве состояний в рамках наглядно-образного мышления в общем случае может быть организовано следующим образом:

а) в решателе задач АИА определяются все различия между формальным описанием ситуации S_T , воспринимаемой в ПС и заданной в декларативной форме представления целью поведения в виде формального описания целевой ситуации среды

S_{II} ;

б) используя формальное описание типовых элементов представления знаний и процедуры вывода решений, например, [13, 14], в пространстве состояний, отражающем переход от одной ситуации к другой ситуации на основе отрабатываемых АИА допустимых действий, генерируется план поведения, обеспечивающий достижение заданной цели. Реализация действий сформированного таким образом плана поведения в результате устранения всех различий между ситуациями S_T и S_{II} приводит к достижению заданной АИА цели поведения.

Планирование целенаправленного поведения в пространстве подзадач сводится к разбиению заданной в процедурной форме представления цели S_{II} на подцели или подзадачи. Такое разбиение, как

правило, осуществляется автоматически до уровня детализации, позволяющего установить отдельные результативные действия, отработка которых в упорядоченной последовательности обеспечивает достижение стоящей цели в текущей ситуации ПС [15, 16].

Следует отметить, что основным недостатком решения сложных задач, связанных с необходимостью планирования целенаправленного поведения АИА на основе широко применяемых процедур вывода в пространстве состояний и подзадач [11, 12], является построение большой размерности дерева решений. Это связано с образованием в нем в процессе автоматической генерации в интеллектуальном решателе задач пустых альтернатив или ветвей, не связанных с достижением стоящей цели [17]. В свою очередь, большая размерность пространства поиска приводит к достаточно высокой сложности решения различных задач, ограничивающей эффективность применения данных методов планирования для организации целенаправленной деятельности АИА, интеллектуальный решатель которых, как правило, обладает достаточно ограниченными вычислительными ресурсами.

Обойти данный недостаток поиска решения сложных задач в пространстве состояний и подзадач позволяет подход связанный с построением модели представления знаний и мыслительных актов вывода решений, которые обеспечивают возможность планирования поведения АИА путем выполнения целенаправленного преобразования формального описания текущей ситуации ПС и сравнения результатов получаемых на каждом шаге планирования с заданной целью. Это позволяет избежать построения пространства поиска решения сложных задач, имеющего большую размерность за счет исключения в нем генерации пустых альтернатив. Другими словами, такой подход обеспечивает возможность автоматической генерации пространства поиска, включающее только результативные с точки зрения достижения заданной цели действия [13 – 16].

Понятийное мышление АИА. Данный вид мышления является в настоящее время наименее формализованным видом мыслительной деятельности АИА, требующим проведения всесторонних исследований связанных с разработкой мыслительных актов его эффективной реализации. Область применения данной формы мышления связана с решением сложных задач, когда исходное местоположение АИА определяется одной ситуацией ПС, а цель достигается в абсолютно другой ее ситуации. Иначе говоря, понятийное мышление включается АИА в процессе планирования целенаправленного поведения, предусматривающего для достижения заданной цели необходимость перехода из исходной ситуации ПС в другую ситуацию среды расположенную за пределами разрешающей способности его технического зрения.

В качестве примера, рассмотрим задачу, требующую от АИА для планирования целенаправленного поведения реализации мыслительных актов в виде рассуждений в рамках понятийного мышления. Пусть в исходном состоянии АИА находится в текущей ситуации ПС S_T . Для выполнения сформулированного АИА задания или для достижения общей цели поведения $S_{Ц}$, ему требуется решить ряд промежуточных подзадач

$$c_k \in Ck = \overline{1, m_1}.$$

Для этого АИА переходит в новые условия функционирования, которые определяются, соответственно ситуациями S_k , которые непосредственно не связаны с преобразованием исходной ситуации S_T , т.е. в исходном положении АИА, ситуации S_k не попадают в зону разрешающей способности его технического зрения. Таким образом, для достижения заданной цели $S_{Ц}$ АИА необходимо автоматически построить план целенаправленного поведения, используя следующую общую схему планирования:

1) находясь в ситуации S_T , интеллектуальный агент формирует план поведения, обеспечивающий ему переход в целевую ситуацию $S_{Ц}$, используя в качестве ориентиров ряд промежуточных ситуаций S_k , в каждой из которых у него может возникнуть необходимость в достижении определенной промежуточной подцели поведения, связанной с решением подзадачи c_k ;

2) после целенаправленной смены обстановки, т.е. перехода в определенную промежуточную ситуацию S_k , АИА, используя инструментальные средства наглядно-действенного или наглядно-образного мышления, если требуется, может сформировать план поведения, обеспечивающий ему достижение промежуточной подцели c_k соответствующей текущей фазе поведения;

3) после попадания на последнем этапе полифазной деятельности в ситуацию S_{m_1} АИА генерирует план поведения позволяющий достичь заданную ему цель поведения $S_{Ц}$ и таким образом выполнить сформулированное ему задание.

Пусть, например, автономному транспортному роботу оснащенному манипулятором и техническим зрением требуется загрузить и перевести из склада определенного вида заготовки в заданный цех и поместить их в бункер робототехнического комплекса с ЧПУ, на котором выполняется первая технологическая операция их обработки.

В этом случае планирование АИА целенаправленного поведения, на основе мыслительных актов понятийного мышления, и полученного задания, может быть выполнено путем построения цепочки взаимосвязанных между собой рассуждений позволяющих определить все необходимые для достижения заданной цели промежуточные подцели и действия, обеспечивающие их эффективную реализацию. Оперирова, в процессе таких рассуждений понятия и типовыми сценариями, отражающими в общем виде различные закономерности допустимых изменений условий функционирования, АИА для достижения заданной цели требуется сформировать план поведения, обеспечивающий его переход из одних условий функционирования в другие условия, которые принципиально отличаются по своему содержанию друг от друга.

Таким образом, для обеспечения высоких функциональных возможностей АИА с целью решения сложных практических задач поведения необходимо разработать мыслительные акты обеспечивающие вывод решений, позволяющий для достижения заданной цели, оперирова типовыми подзадачами поведения, обеспечить АИА эффективную смену условий функционирования или организовать планирование полифазной деятельности в сложной ПС [18].

Следует отметить, что к широко исследованным в настоящее время мыслительным актам, формализующим отдельные механизмы понятийного мышления АИА, можно отнести различные правила вывода как отдельных [3, 19], так и сложных цепочек взаимосвязанных между собой простых умозаключений. Использование такой логики рассуждений позволяет организовать эффективным образом пополнение знаний АИА. [20, 21]

Однако, мыслительных актов, построенных на основе дедуктивных, индуктивных, традиционных и других аналогичных правил вывода [19] как истинных, так и правдоподобных умозаключений, для эффективной реализации понятийного мышления, позволяющего АИА планировать полифазное целенаправленное поведение, связанное с выполнением сложных заданий, явно не достаточно. В частности, требуется построение нетрадиционных схем рассуждений, позволяющих АИА в процессе планирования полифазного поведения сформулировать и дать ответы на следующие важные для достижения цели вопросы:

– как наилучшим образом обеспечить целенаправленную смену условий

функционирования и автоматически формулировать соответствующие этим условиям промежуточные подцели, достижение которых обеспечивает эффективную реализацию основной цели поведения?

– что необходимо предпринять для получения наиболее эффективных промежуточных результатов на альтернативной основе в процессе планирования полифазного поведения?

Разработка такой логики комбинирования взаимосвязанных суждений и рассуждений, оперирующих сценариями пространства перехода из одних условий функционирования в другие условия, например, на основе многоярусных схем вывода позволяет создать интеллектуальный решатель задач АИА, обеспечивающий возможность планирования целенаправленного полифазного поведения как в априори неописанных, так и в заданных реальных ПС.

Заключение

1. Разработка интеллектуального решателя задач, в котором реализуются различные формы мышления, позволяет создать АИА, способного эффективным образом планировать целенаправленное поведение в процессе решения различных по сложности задач в реальных проблемных средах.

2. Наименее разработанными и формализованными в настоящее время являются инструментальные средства понятийного мышления, обеспечивающие возможность АИА решения сложных задачи, требующих для достижения заданной цели перехода из одной ситуации ПС в принципиально отличающуюся от нее другую ситуацию среды.

3. Основная проблема создания инструментальных средств понятийного мышления связана с разработкой модели представления знаний и процедур планирования поведения, которые позволяют АИА строить сложные сценарии перехода из исходной ситуации в необходимую для достижения заданной цели ситуацию ПС.

Дополнительная информация

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты 18-07-00025 А и 17-29-070003 офи_м.

Additional Information

The study was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research, projects 18-07-00025 A and 17-29-070003 ofi_m.

Литература

1. Поддьяков Н.Н. Мышление дошкольника. М.: Педагогика, 1977. 277 с.
2. Анохин П.К. Системные механизмы высшей нервной деятельности. М.: Наука, 1979. 454 с.
3. Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. М.: Радио и связь, 1989. 184 с.
4. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990. 147 с.
5. Мелехин В.Б. Модель представления и получения новых знаний автономным интеллектуальным роботом на основе логики условно-зависимых предикатов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 85 – 105.
6. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энеоатомиздат, 1994. 240 с.
7. Кулинич А.А., Карпов В.Э., Карпова И.П. Социальные сообщества роботов. М.: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2019. 352 с.
8. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020. 940 с.
9. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Организация знако-сигнального принципа управления целесообразным поведением интегрального робота // Автоматика и телемеханика. 1991. № 12. С. 118 – 127.
10. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Нечеткие семантические сети как адаптивная модель представления знаний автономных интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 3. С. 61 – 72.
11. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. М.: Вильямс. 2015. 1408 с.
12. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. М.: Книга по требованию. 2012. 369 с.
13. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Часть 1. Структура и применение фрейм-микропрограмм поведения // Искусственный интеллект и принятие решения. 2018. № 2. С. 73 – 83.
14. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Часть 2. Структура и применение фреймов действий // Искусственный интеллект и принятие решения. 2018. № 3. С. 46 – 56.
15. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Разбиение сложных задач на подзадачи в процессе планирования целенаправленного поведения интегрального беспилотного летательного аппарата в пространстве состояний // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3 (49). Т.1. С. 237 – 244.
16. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интегрального беспилотного летательного аппарата на основе разбиения сложных задач на подзадачи в пространстве состояний // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3 (49). Т.1. С. 245 – 252.

17. Kelli A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 808 p.
18. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование полифазного поведения самоорганизующихся интеллектуальных систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. № 5. С. 62 – 65.
19. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. 2-е изд. доп. и испр. М.: Физматлит, 2008. 729 с.
20. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Пополнение знаний автономного беспилотного квадрокоптера - манипулятора в недоопределенной проблемной среде // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 39-48.
21. Мелехин В.Б. Пополнение знаний автономного интеллектуального робота в недоопределенных средах на основе комбинированных правил вывода логики условно-зависимых рассуждений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 3. С. 11 – 20.

References

1. Podd'yakov N.N. Myshlenie doshkol'nika [Preschooler thinking]. Moscow, Pedagogika, 1977. 277 p.
2. Anohin P.K. Sistemnye mekhanizmy vysshej nervnoj deyatel'nosti [Systemic mechanisms of higher nervous activit]. Moscow, Nauka, 1979. 454 p.
3. Pospelov D.A. Modelirovanie rassuzhdenij. Opyt analiza myslitel'nyh aktov [Modeling reasoning. Experience in the analysis of mental acts]. Moscow, Radio i svyaz', 1989. 184 p.
4. Kalyaev A.V., Chernuhin Yu.V., Noskov V.N., Kalyaev I.A. Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnyh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow, Nauka, 1990. 147 p.
5. Melekhin V.B. Model' predstavleniya i polucheniya novyh znaniy avtonomnym intellektual'nyim robotom na osnove logiki uslovno-zavisimyh predikatov [Model of representation and acquisition of new knowledge by an autonomous intelligent robot based on the logic of conditionally dependent predicates]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Computer and Systems Sciences International], 2019, 5, pp. 85 – 105.
6. Bershtejn L.S., Melekhin V.B. Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota [Planning the behavior of an intelligent robot]. Moscow, Enegoatomizdat, 1994. 240 p.
7. Kulinich A.A., Karpov V.E., Karpova I.P. Social'nye soobshchestva robotov [Social communities of robots]. Moscow, URSS, ООО «LENAND», 2019, 352 p.
8. Sajmon D. Algoritmy evolyucionnoj optimizacii [Algorithms of evolutionary optimization]. Moscow, DMK Press, 2020, 940 p.
9. Bershtejn L.S., Melekhin V.B. Organizaciya znako-signal'nogo principa upravleniya celesobraznym povedeniem integral'nogo robota [Organization of the Signal-Signal Principle of Controlling the Appropriate Behavior of an Integral Robot]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control], 1991. 12, pp. 118 – 127.
10. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Nechetkie semanticheskie seti kak adaptivnaya model' predstavleniya znaniy avtonomnyh intellektual'nyh sistem [Fuzzy semantic networks as an adaptive model for representing knowledge of autonomous intelligent systems]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision making], 2020, 3. pp. 61 – 72.
11. Norvig P. Iskusstvennyj intellekt. Sovremennyy podhod. Rukovodstvo [Artificial intelligence. Modern approach. Leadership]. Moscow, Vil'yams. 2015, 1408 p.
12. Nil'son N. Principy iskusstvennogo intellekta [Principles of Artificial Intelligence]. Moscow, Kniga po trebovaniyu, 2012, 369 p.
13. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Pnirovanie povedeniya intellektual'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v nedoopredelennoj problemnoj srede. Chast' 1. Struktura i primenenie frejm-mikroprogramm povedeniya [Studying the behavior of an intelligent unmanned aerial vehicle in an underdetermined problematic environment. Part 1. Structure and application of behavior frame microprograms]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie resheniya Artificial intelligence and decision making], 2018, 2, pp. 73 – 83.
14. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie povedeniya intellektual'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v nedoopredelennoj problemnoj srede. Chast' 2. Struktura i primenenie frejmov dejstvij [Planning the behavior of an intelligent unmanned aerial vehicle in an undefined problematic environment. Part 2. The structure and application of action frames]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie resheniya [Artificial intelligence and decision making], 2018. 3, pp. 46 – 56.
15. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Razbienie slozhnyh zadach na podzadachi v processe planirovaniya celenapravlenno go povedeniya integral'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v prostranstve sostoyanij [Breaking down complex tasks into subtasks in the process of planning the purposeful behavior of an integral unmanned aerial vehicle in the state space]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies], 2020, 3 (49), V.1, pp. 237 – 244.
16. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie povedeniya integral'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata na osnove razbieniya slozhnyh zadach na podzadachi v prostranstve sostoyanij [Planning the behavior of an integrated unmanned aerial vehicle based on dividing complex tasks into subtasks in the state space]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies], 2020, 3 (49), V.1, pp. 245 – 252.
17. Kelli A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 808 p.
18. Bershtejn L.S., Melekhin V.B. Planirovanie polifaznogo povedeniya samoorganizuyushchihsysa intellektual'nyh sistem [Planning polyphase behavior of self-organizing intelligent systems]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Computer and Systems Sciences International], 2000, 5, pp. 62 – 65.

19. Vagin V.N., Golovina E.Yu., Zagoryanskaya A.A., Fomina M.V. Dostovernyj i pravdopodobnyj vyvod v intellektual'nyh sistemah [Reliable and plausible conclusion in intelligent systems]. Pod red. V.N. Vagina, D.A. Pospelova. 2 izd. dop. i ispr. Moscow, Fizmatlit, 2008, 729 p.
20. Melekhin V.B., Hachumov V.M. Popolnenie znanij avtonomnogo bespilotnogo kvadrakoptera - manipulyatora v nedoopredelennoj problemnoj srede [Replenishment of knowledge of an autonomous unmanned quadcopter-manipulator in an underdetermined problematic environment]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie resheni [Artificial Intelligence and Decision Making], 2019, 1. pp. 39–48.
21. Melekhin V.B. Popolnenie znanij avtonomnogo intellektual'nogo robota v nedoopredelennyh sredah na osnove kombinirovannyh pravil vyvoda logiki uslovno-zavisimyh rassuzhdenij [Replenishment of knowledge of an autonomous intelligent robot in underdetermined environments based on combined rules for deriving the logic of conditionally dependent reasoning]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial Intelligence and Decision Making], 2016, 3, pp. 11 – 20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70;. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamilya, 70;. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Михаил Вячеславович Хачумов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9; старший преподаватель кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: khmike@inbox.ru

Mikhail V. Khachumov, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9; Senior Lecturer of the Information Technologies Department, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow Miklukho-Maklaya str. 6,.E-mail: khmike@inbox.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 629.12.001.2

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.032

Оптимизация рыбодобывающей деятельности в многовидовых промысловых системах - промысловых зонах в статическом их состоянии с учетом биотехнологического дуализма (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна)

С.В. Лисиенко¹, Н.С. Иванко¹

¹ Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация Повышение эффективности отечественного рыболовства, как совокупности промышленных биотехнологий, создающих индустриальные системы высшего уровня, является одной из основных задач при реализации стратегии развития рыбохозяйственного комплекса страны в долгосрочной перспективе. В этой связи, базисным объектом системного исследования является промысловая зона рыбохозяйственного бассейна как многовидовая промысловая система взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов: ресурсного потенциала и рыбодобывающих единиц, образующих внутреннюю среду системы, совокупности условий ведения промысла, составляющих ее внешнюю среду.

Исследование производственных процессов при статическом состоянии названной системы является основополагающим процессом, опирающемся на учет ее двуединой природы – биотехнологического дуализма. Обязательный его учет лежит в основе формирования оптимальных схем расстановки промысловых усилий в промысловых зонах при организации рыболовства, планировании и управлении производственно-технологическим процессом добычи водных биоресурсов на основе рациональной их эксплуатации и с целью повышения эффективности работы добывающего флота за счет повышения их эксплуатационного времени при годовом и рейсовом планировании.

Решение оптимизационной задачи в статике в процессе моделирования таких производственно-технологических систем в статическом их состоянии направлено на проведение оптимизации рыбодобывающей деятельности с учетом биотехнологического дуализма, присущего многовидовым промысловым системам – промысловым зонам. Целью оптимизации является получение оптимального количества промысловых единиц, основанное на альтернативном принципе использования судов определенного типа.

Ключевые слова: Промышленное рыболовство, многовидовая промысловая система, технология добычи, общий допустимый улов, Северо-Курильская зона, добыча водных биологических ресурсов, математическая модель промысла, оптимизация.

Optimization of fishery industry activities in multi-species fisheries: catching areas in their static state, taking into account bio-inspired dualism (on the example of the North Kuril region of the Far Eastern fishery basin)

Svetlana V. Lisienko¹, Nina S. Ivanko¹

¹ Far Eastern State Technical University of Fisheries

Abstract: Improving the efficiency of domestic fisheries, as a set of industrial biotechnologies that create industrial systems of the highest level, is one of the main tasks in implementation of strategy for development of the country's fishery complex in the long term. In this regard, the basic object for a systemic study is the catching area of the fishery basin as a multi-species fishery system of interrelated and interdependent components: resource potential and fishery units that form internal environment of the system along with a set of conditions for catching activities that make up its external environment.

The study of industrial processes in a static state of the named system is a fundamental process based on consideration of its dual nature: bio-inspired dualism. Its mandatory consideration underlies formation of optimal schemes for arrangement of fishery efforts in catching zones when organizing fishery industry, planning and managing the industrial process of harvesting aquatic biological resources based on rational operation thereof, and in order to increase efficiency of catching fleet by increasing its operating time during the annual and voyage planning.

The solution for optimization problem in statics in the process of modeling such industrial-process systems in their static state is aimed at optimizing fishery activities taking into account the bio-inspired dualism inherent in multi-species fisheries: catching areas. The aim of optimization is to obtain an optimal number of fishery units based on an alternative principle of using vessels of a certain type.

Key words: Industrial fishery, multi-species fishery system, harvesting system, total allowable catch, North Kuril region, harvesting of aquatic biological resources, mathematical model of catching activity, optimization.

Введение

Повышение эффективности отечественного рыболовства является одной из основных задач при реализации стратегии развития рыбохозяйственного комплекса страны в долгосрочной перспективе. Определяющая цель развития и поступательного совершенствования отечественного рыболовства на современном этапе, безусловно, связана с рациональной эксплуатацией биоресурсов Мирового океана как объекта эффективного природопользования. В этой связи, повышение эффективности рыболовства, как совокупности промышленных биотехнологий, создающих индустриальные системы высшего уровня, рассматривается как достижение соответствия количества и качества – прироста объемов добычи, сопровождающегося полным их освоением [1].

В этом контексте разработанные авторами теоретические и методологические основы современного подхода к повышению эффективности рыболовных процессов и систем лежат в плоскости исследования организационно-управленческих аспектов рыборобывающей деятельности на новом качественном уровне развития теории промышленного рыболовства [2,3,4]. Базисным объектом системного исследования является промысловая зона рыбохозяйственного бассейна как многовидовая промысловая система взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов: ресурсного потенциала и рыборобывающих единиц, образующих внутреннюю среду системы, совокупности условий ведения промысла, составляющих ее внешнюю среду [5].

1. Постановка задачи оптимизации

Организация рыболовства в промысловых зонах как совокупность форм, методов и приемов, обеспечивающих соединение во времени и пространстве средств труда - промысловых судов, предметов труда - промысловых объектов, и самого труда - технологий добычи, требует обязательного учета всех сопровождающих рыборобывающий процесс компонентов внутренней и внешней среды как в статическом, так и в динамическом состояниях многовидовой промысловой системы [5]. Одним из таких компонентов, безусловно, является система транспортного обслуживания промыслового флота [6].

Причем, исследование производственных процессов при статическом состоянии названной системы является основополагающим процессом, опирающимся на учет ее двуединой природы - биотехнологического дуализма. С одной стороны, исследуется потенциальная возможность биоресурсов промысловой зоны для освоения на основе промысловой доступности объектов промысла. С другой стороны, исследованию подлежит техническая, технологическая и нормативно-правовая составляющие производственного процесса по освоению водных биоресурсов - использование добывающих судов, технико-эксплуатационные и технологические характеристики которых могут, при определенных условиях, связанных с большой неопределенностью и стохастическим характером рыборобывающей

деятельности, ограничивать их использование на промысле правовые нормы регулирования рыболовства, запрещающие или ограничивающие ведение добывающей деятельности [6,7,8]. Иными словами, на всей протяженности промысловой доступности объектов промысла его непрерывное освоение добывающим флотом различных типов не может быть перманентным.

Учет двух этих обстоятельств лежит в основе формирования оптимальных схем расстановки промысловых усилий в промысловых зонах при организации рыболовства, планировании и управлении производственно-технологическим процессом добычи водных биоресурсов на основе рациональной их эксплуатации и с целью повышения эффективности работы добывающего флота за счет повышения их эксплуатационного времени при годовом и рейсовом планировании.

В этой связи процесс моделирования таких производственно-технологических систем при статической постановке оптимизационной задачи проходит в два этапа.

На первом этапе строится и обосновывается обобщенная модель технологического процесса ведения рыборобывающей деятельности, проводится максимизация суммарных объемов вылова всех объектов добычи при ограничении на вылов по одуемым промысловым объектам в статически установленном временном интервале - периоде промысловой доступности промысловых объектов [9,10]. Результатами решения такой оптимизационной задачи являются оптимальные схемы освоения ресурсного потенциала добывающими судами разных типов с учетом технологической оснащенности в течении заданного периода промысловой доступности.

На втором этапе предлагается провести уточнение режимных и эксплуатационных характеристик добывающих судов с учетом их типов, накладывающих определенные ограничения на изъятие водных биоресурсов, находящихся в режиме промысловой доступности. Кроме того, в этой части моделирования особое место уделено учету нормативных ограничений, устанавливаемых законодательными документами в области ведения рыболовства - Правилами рыболовства (по рыбохозяйственному бассейну).

Суть данного этапа - провести оптимизацию технологического процесса ведения добычи водных биологических ресурсов с учетом ограничительных характеристик привлекаемых добывающих судов на примере рыборобывающего процесса в промысловой зоне – Северо-Курильская зона Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна. Целью такой оптимизации является получение оптимального количества промысловых единиц, основанное на альтернативном принципе использования судов определенного типа.

2. Алгоритм и методика моделирования

Исходными данными для решения задачи оптимального распределения флота для получения максимального освоения общедоступного улова (далее- ОДУ) и квот по добыче (вылову) являются одуемые и неодуемые объекты добычи и добывающие суда, обладающие ресурсно-ориентированными технологиями добычи. Каждый

объект промысла обладает промысловой доступностью, которая определяется исходя их биологического состояния объекта, а также может быть ограничена нормативно-законодательным инструментом - правилами рыболовства для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна.

Иными словами, каждый объект промысла в некоторый момент времени может находиться в одном из состояний: быть доступным для промысла; быть недоступным для промысла; быть запрещенным для промысла. Первые два состояния определяются биологическими характеристиками объекта, третье состояние регламентируется правилами рыболовства.

На первом этапе решения задачи оптимизации распределения добывающего флота определяется перечень объектов промысла и их промысловая доступность. В этой связи, каждый объект описывается следующим образом: $O(X, ОДУ, D[12])$, где X - характеристика объекта как одуемого или неодуемого, $ОДУ$ - объем $ОДУ$ для одуемых объектов, $D[12]$ - вектор доступности объекта в течение календарного года. Пример описания промысловых объектов Северо-Курильской зоны представлен в таблице 1.

Таблица 1

Описание объектов промысла

Объект	Минтай	Навага	Палтусы
ОДУ/неОДУ	ОДУ	неОДУ	ОДУ
Объем ОДУ	110,8		0,063
Январь	доступен	доступен	доступен

Февраль	доступен	доступен	доступен
Март	доступен	доступен	доступен
Апрель	доступен	доступен	доступен
Май	доступен	доступен	доступен
Июнь	доступен	доступен	доступен
Июль	доступен	доступен	доступен
Август	доступен	доступен	доступен
Сентябрь	доступен	недоступен	доступен
Октябрь	доступен	недоступен	доступен
Ноябрь	доступен	доступен	доступен
Декабрь	доступен	доступен	доступен

Наряду с этим, важным параметром является добывающее судно. Каждое судно обладает определенными характеристиками, на основании которых определяется возможность его эксплуатации. Таким образом, добывающее судно можно описать следующим образом $ДС(P, П[])$, где P - тип добывающего судна, $П[]$ - вектор характеристик добывающего судна, которые необходимы для определения суточного вылова. В рамках поставленной задачи вектор характеристик добывающих судов содержит 4 элемента: время непрерывного пребывания судна в море, время стоянки судна в порту, время, затрачиваемое на переход (по умолчанию взято время перехода судна из порта Владивосток) и время межрейсового технического обслуживания судна.

Пример описания добывающих судов, используемых для добычи объектов Северо-Курильской зоны представлен в таблице 2.

Таблица 2

Описание добывающих судов

N/N	Тип судна	Время непрерывного пребывания в море	Время стоянки в порту	Время затрачиваемое на переход	Время МРТО
1.	БМРТ	155	10	7	25
2.	РС	55	10	12	15
3.	РТМ	145	10	8	25
4.	РТМС	155	10	8	25

На втором этапе устанавливаются взаимосвязи между объектом промысла, технологией добычи и типом добывающего судна путем создания технологических цепочек по принципу "объект промысла – добывающее судно – технология добычи". Основным количественным показателем работы добывающего судна любого типа с определенной технологией добычи является его суточный вылов, рассчитываемый как произведение объема вылова за один производственный цикл работы орудия (единичное промысловое усилие) и количества одноименных производственных циклов. Как правило, на практике, при циклическом планировании единичное промысловое усилие может быть заданной величиной на основе среднестатистических показателей по типу судну и

технологии добычи, либо может быть получено путем выборки такого среднего значения при проведении пробных единичных операций, например, пробных тралений, пробных постановок ловушек и т.д. В этой связи, установление суточного объема вылова для каждой выше обозначенной цепочки производится в соответствии с типом судна и его технологией добычи на обозначенном временном интервале. Данную связь можно описать как $V(O, T, ДС, В)$, где O - объект промысла, объектов, T - технология добычи, $ДС$ - тип добывающего судна, $В$ - среднестатистическое значение вылова. В таблице 3 представлен пример описанного взаимосвязанного соотношения.

Таблица 3
Технологическая цепочка «объект промысла – добывающее судно – технология добычи»

Объект	Технология добычи	Судно	Вылов
Минтай	Траловый лов	РС	25
Минтай	Траловый лов	СТР	35
Минтай	Траловый лов	БМРТ	80
Минтай	Траловый лов	СРТМ	40
Минтай	Траловый лов	РТМ	70
Навага	Снюрреводный лов	РС	3
Навага	Траловый лов	СТР	2
Палтусы	Ярусный лов	РС	12
Палтусы	Ярусный лов	СРТМ	16
Палтусы	Ярусный лов	СЯМ	15
Палтусы	Ярусный лов	СТР	18

Для проведения оптимизации процессов освоения ресурсного потенциала в статическом состоянии многовидовой промысловой системы - Северо-Курильская зона Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна разработан комплекс

программных средств «Многовидовая промысловая система», предназначенный для решения задачи оптимизации распределения добывающего флота с целью повышения освоения всех объектов с учетом ресурсно-ограничительного дуализма объекта исследования. Программный комплекс состоит из двух основных частей: базы данных и программной оболочки.

Для решения поставленной задачи в базе данных выделены 5 сущностей: объекты промысла, объекты по зонам, добывающие суда, технологии промысла и объект-технология-судно. Схема данных представлена на рисунке 1.

Сущность «Объекты промысла» хранит названия всех промысловых объектов, т.к. объекты промысла в разных зонах могут иметь различные характеристики (одуемый, неодуемый или запрещенный к промыслу и т.д.) введена сущность «Объекты по зонам», которая содержит основную информацию об объекте промысла в конкретной зоне, согласно описанию $O(X, ODU, D[12])$. Сущность «Добывающие суда» хранит сведения о добывающих судах, используемых для работы с указанными объектами по известным технологиям добычи, описание выполнено согласно $ДС(T, П[])$.



Рис. 1. Схема данных базы данных

Схема формирования базы данных представлена на рисунке 2. Данная схема реализована в виде модуля «Управление базой данных», который включен в программную оболочку.

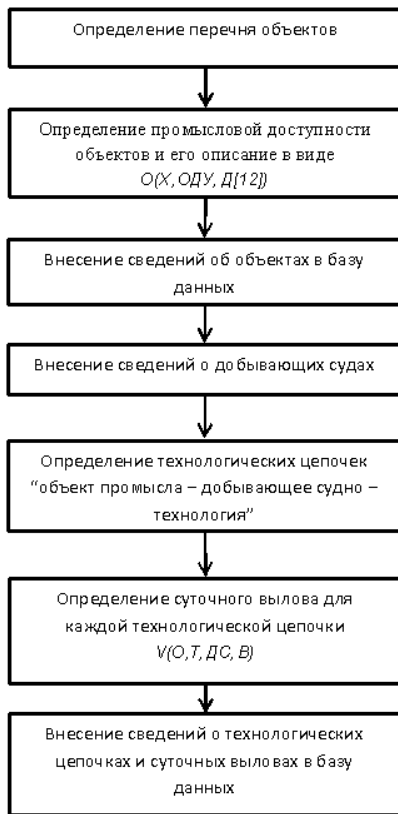


Рис. 2. Схема формирования базы данных

На рисунке 3 представлен алгоритм работы программного комплекса. Основным режимом работы программного комплекса определяется действия пользователя.

Расчет количества необходимых судов производится на основании промысловой доступности объекта, типа выбранного судна, т.е. времени непрерывного пребывания судна в море и годового режима работы добывающего судна.

В основном алгоритме работы программного комплекса «Многовидовая промысловая система» имеется модуль расчета времени промысла объекта. Расчет времени промысловой доступности объекта выполняется на основании статистических данных о промысловой доступности объекта с учетом правил

$$t_{21} = \begin{cases} 360 - t_{вне} - t_{МРТО} - 2(t_{переход} + t_{порт}), & \text{если судно выводится из эксплуатации} \\ 360 - 2t_{МРТО} - 2(t_{переход} + t_{порт}), & \text{если судно не выводится из эксплуатации} \end{cases}$$

где $t_{вне}$ - внеэксплуатационный период, $t_{МРТО}$ период межрейсового технического обслуживания, $t_{переход}$ - время перехода судна от порта базирования к району промысла, $t_{порт}$ - время стоянки судна в порту.

Расчет возможного времени эксплуатации судна исходя их времени непрерывного пребывания в море для этого типа судна осуществляется по формуле:

$$t_{22} = 2t_m - 2t_{переход},$$

где t_m - время непрерывного пребывания судна в море, $t_{переход}$ - время перехода судна от порта базирования к району промысла.

рыболовства. Данные о доступности объекта берутся из базы данных.

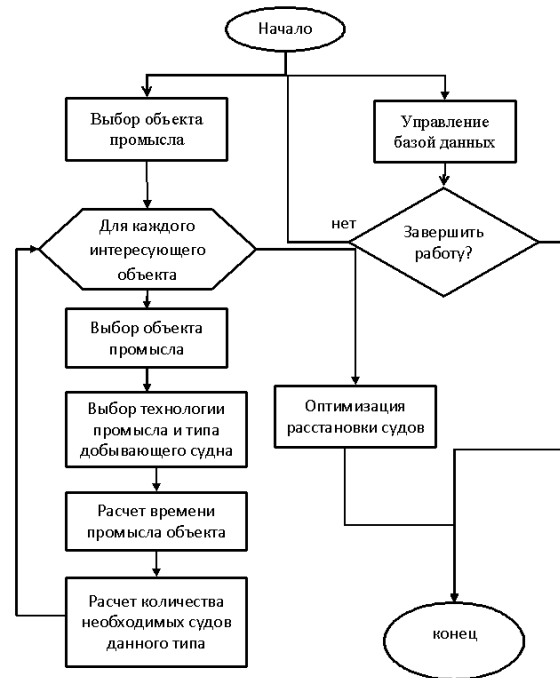


Рис. 3. Алгоритм работы программного комплекса

Время промысловой доступности объекта рассчитывается по формуле:

$$t_1 = 360 - t_{не},$$

где $t_{не}$ - время недоступности объекта для промысла (запрет добычи, согласно правил рыболовства или прочих нормативных документов).

Расчет времени нахождения добывающего судна на промысле выполняется по формулам:

$$t_2 = \min(t_{21}, t_{22}),$$

где t_{21} - возможное время эксплуатации судна на промысле, за вычетом времени МРТО, перехода в район промысла и стоянки в порту, t_{22} - возможное время эксплуатации судна исходя их времени непрерывного пребывания в море для этого типа судна.

Расчет возможного времени эксплуатации судна выполняется по формуле:

На основании полученных значений вычисляется время фактического лова по формуле:

$$t_{пром} = \min(t_1, \min(t_{21}, t_{22})).$$

Потребное количество судов вычисляется по формуле, исходя из того, что количество судов это целое число. Следовательно, при расчете отбирается целая часть от полученного значения:

$$N = \left\lfloor \frac{ОДУ}{t_{пром} \cdot V_{сут}} \right\rfloor, \quad (1)$$

где $V_{сут}$ - объем суточного вылова объекта.

Процент освоения квоты вычисляется по формуле:

$$P = \frac{t_{\text{пром}} \cdot V_{\text{сут}} \cdot N}{\text{ОДУ}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Процесс расчета потребного количества судов и процента освоения ОДУ представлен на схеме 4. Выделенные курсивом значения не могут быть изменены пользователем, т.к. определяются нормативами.



Рис. 4. Алгоритм расчета потребного количества судов и процента освоения ОДУ

При запуске программы открывается основное окно, в котором пользователь выбирает промысловую зону, для которой будет выполнена оптимизация или переходит к модулю управления базой данных. После выбора промысловой зоны доступны все объекты данной зона.

Для выполнения расчета необходимо выбрать некоторый объект, например, минтай. Тогда фактически отображается его промысловая доступность. Если выбранный объект промысла обладает промысловой доступностью в течение всего календарного года, при отображении доступности объекта использован только белый цвет.

Далее выполняется расчет для каждого типа добывающего судна с соответствующей промысловому объекту технологией добычи.

Выполняемые действия контролируются пользователем. В процессе работы пользователь выбирает объект промысла, автоматически для него из базы данных выбирается значение ОДУ (если объект одуемый), это значение может быть скорректировано пользователем, если его интересует расчет только для определенной доли ОДУ, в этом случае значение ОДУ должно быть изменено в таблице и для дальнейших расчетов будет использовано именно это значение. В соответствии с выбранным объектом промысла пользователю доступны технология добычи и тип

добывающего судна, которые могут быть задействованы при добыче данного объекта.

Основной расчет ведется при определении количества судов и процента освоения ОДУ.

На основании выбранного типа судна и технологии добычи для указанного пользователем объекта из базы данных выбираются следующие значения:

- Объем суточного вылова,
- Время непрерывного пребывания в море,
- Время стоянки судна в порту,
- Время перехода порт-промысел-порт,
- Время МРТО.

При этом значения параметров время непрерывного пребывания в море и время стоянки судна в порту не могут быть изменены пользователем, остальные параметры могут быть откорректированы в процессе расчета.

На основании данных значений, а так же значения ОДУ вычисляется необходимое количество судов по формуле (1) и процент освоения ОДУ по формуле (2).

Таким образом, пользователь выбирает объект промысла, а в соответствии с выбранным объектом технологию промысла и тип добывающего судна. Из базы данных выбираются значения ОДУ, объем суточного вылова и характеристики судна. Выполняется расчет потребного количества добывающих судов и процент освоения ОДУ.

Проведение расчетов позволяет получить несколько альтернативных вариантов использования выбранных типов добывающих судов. Например, при организации ведения добычи минтая разноглубинным тралом возможно использование пяти типов добывающих судов, технологически оснащенных траловым промысловым оборудованием: РС, СТР, БМРТ, СРТМ, РТМ. Для каждой созданной на этом принципе технологической цепочки «объект промысла – добывающее судно – технология» выполняется расчет необходимого количества судов и процент освоения ОДУ этими судами. Пример расчета представлен на рисунке 5.

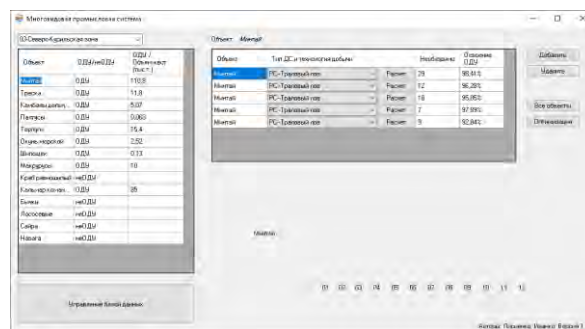


Рис. 5. Окно с результатами расчетов для выбранного объекта промысла

Таким образом, для объекта промысла «минтай» получены следующие результаты: могут быть использованы суда 5 типов, необходимое их количество находится в интервале от 12 единиц добывающих судов типа БМРТ до 29 единиц добывающих судов типа РС. Результаты освоения ОДУ данными типами добывающих судов показывают, что наибольший процент освоения будет достигнут при использовании 13 судов типа РТМ, в этом случае он составит порядка 99,84%.

Результаты расчетов формируются в табличном виде.

Таблица 4

Пример результатов расчета для одного объекта

Объект	Тип добывающего судна и технология промысла	Потребное кол-во судов	Процент освоения ОДУ
Минтай	РС--Траловый лов	29	98,41%
Минтай	СТР--Траловый лов	18	96,28%
Минтай	БМРТ--Траловый лов	12	95,85%
Минтай	СРТМ--Траловый лов	18	97,89%
Минтай	РТМ--Траловый лов	13	99,84%

Заключение

Представленный разработанный комплекс программных средств "Рыбодобывающий процесс в многовидовой промысловой системе - промысловая зона" реализует научно-обоснованный подход к формированию целостности процессов освоения ресурсного потенциала в статическом состоянии многовидовой промысловой системы - промысловая

зона, обладающей ресурсно-ограничительным дуализмом, как основы для последующего формирования оптимальных схем расстановки промысловых усилий в промысловых зонах, являющихся индустриальными логистическими системами, при организации рыболовства, планировании и управлении производственно-технологическим процессом добычи водных биоресурсов на основе рациональной их эксплуатации и с целью повышения эффективности работы добывающего флота за счет повышения их эксплуатационного времени при годовом и рейсовом планировании. Наряду с этим, названный комплекс программных средств является необходимым инструментом для решения практических задач рыбодобывающих компаний и при системном решении задач работы добывающего флота в промысловых зонах рыбохозяйственных бассейнов в контексте обоснования его количественного и качественного состава в целях реализации стратегии рациональной эксплуатации биоресурсов Мирового океана как объекта эффективного природопользования и достижения оптимальной сбалансированности между количественными и качественными характеристиками рыболовства.

Литература

1. Лисиенко С. В. Совершенствование организации ведения добычи водных биологических ресурсов с целью успешной реализации стратегического развития отечественного рыболовства // Рыбное хозяйство, № 3, 2013 г. с. 17-21.
2. Лисиенко С. В. Концептуальный подход к совершенствованию организации ведения добычи водных биологических ресурсов в контексте развития общей теории промышленного рыболовства (на примере Дальневосточного региона) // Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2014. № 1. с.18-28.
3. Мельников В.Н., Мельников А. В. Совершенствование общей теории промышленного рыболовства // Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.42-53.
4. Лисиенко С. В. Теоретические основы формирования логистического подхода как методологии совершенствования организации и управления промысловыми системами при ведении добычи водных биологических ресурсов // Рыбное хозяйство, № 5, 2013 г. с. 75-79.
5. Лисиенко С. В. О многовидовом рыболовстве в контексте совершенствования системной организации промысла ВБР // Рыбное хозяйство, 2013. - № 4. – с. 34-41.
6. Мойсеенко С. С., Мороз Е. О. Оптимизация системы транспортного обслуживания рыболовных судов // Морские интеллектуальные технологии, № 4(42), т. 3, 2018, с.168-176.
7. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
8. Мойсеенко С. С., Мейлер Л. Е. Рыбопромышленная логистика. Монография/Калининград.: изд-во БГРАФ, 2015. – 174 с.
9. Лисиенко С. В., Вальков В. Е., Иванко Н. С., Бойцов А. Н. Разработка математической модели и оптимизационной задачи по организации и управлению промысловым флотом при ведении добычи водных биологических ресурсов на примере промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне // Морские интеллектуальные технологии, № 4(46), т. 2, 2019, с.147-154.
10. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Моделирование процессов ведения рыбодобывающей деятельности в многовидовой промысловой системе «промысловая зона рыбохозяйственного бассейна» при статической постановке оптимизационной задачи (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна) бассейне // Морские интеллектуальные технологии, № 3(49), т. 1, 2020, с.253-259.

References

1. Lisienko S. V. Sovershenstvovanie organizatsii vedeniya dobychi vodnykh biologicheskikh resursov s tsel'yu uspeшной realizatsii strategicheskogo razvitiya otechestvennogo rybolovstva [Improvement of harvesting of aquatic living organisms with the aim of successful realization of domestic fishing strategic development]. Rybnoe khozyaystvo, № 3, 2013 g. s. 17-21.
2. Lisienko S. V. Kontseptual'nyy podkhod k sovershenstvovaniyu organizatsii vedeniya dobychi vodnykh biologicheskikh resursov v kontekste razvitiya obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva (na primere

- Dal'nevostochnogo regiona)] Conceptual approach to improvement of the organization to carry out exploration of aquatic biological resources in the context of general theory of industrial fishing (by the example of the Far East region)]. Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo, 2014, № 1, s.18-28.
3. Mel'nikov V.N., Mel'nikov A. V. Sovershenstvovanie obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva [Perfection of the general theory of industrial fishery]. Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo, 2010, № 1, s.42-53.
 4. Lisienko S. V. Teoreticheskie osnovy formirovaniya logisticheskogo podkhoda kak metodologii sovershenstvovaniya organizatsii i upravleniya promyslovymi sistemami pri vedenii dobychi vodnykh biologicheskikh resursov // Rybnoe khozyaystvo, № 5, 2013 g. s. 75-79.
 5. Lisienko S. V. O mnogovidovom rybolovstve v kontekste sovershenstvovaniya sistemnoy organizatsii promysla VBR [On the multi-species fisheries in the context of system organization improving when harvesting aquatic resources]. Rybnoe khozyaystvo, 2013, № 4, s. 34-41.
 6. Moysenko S. S., Moroz E. O. Optimizatsiya sistemy transportnogo obsluzhivaniya rybolovnykh sudov [Optimization of the transport service system of fishing vessels]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 4(42), t. 3, 2018, s.168-176.
 7. Andreev M. N., Studenetskiy S. A. Optimal'noe upravlenie na promysle. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1975, 288 s.
 8. Moysenko S. S., Meyler L. E. Rybopromyshlennaya logistika. Monografiya. Kaliningrad.: izd-vo BGRAF, 2016. – 174 s.
 9. Lisienko S. V., Val'kov V. E., Ivanko N. S., Boytsov A. N. Razrabotka matematicheskoy modeli i optimizatsionnoy zadachi po organizatsii i upravleniyu promyslovym flotom pri vedenii dobychi vodnykh biologicheskikh resursov na primere promysla dal'nevostochnoy sardiny (ivasi) i skumbrii v Dal'nevostochnom rybokhozyaystvennom basseyne [Development of a mathematical model and optimization problem on organization and management of the fishing fleet during production of water biological resources on the example of fisheries case far sardines (iwasi) and mackerel in the far east fishery basin]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 4(46), t. 2, 2019, s.147-154.
 11. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modelirovanie protsessov vedeniya rybodobyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovoy promyslovoy sisteme «promyslovaya zona rybokhozyaystvennogo basseyna» pri staticheskoy postanovke optimizatsionnoy zadachi (na primere Severo-Kuril'skoy zony Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna) basseyne // Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 3(49), t. 1, 2020, s.253-259

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Светлана Владимировна Лисиенко, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б
e-mail: lisienkosv@mail.ru

Svetlana V. Lisienko, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern state technical fishery University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Нина Сергеевна Иванко, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б
e-mail: invs@mail.ru

Nina S. Ivanko, graduate student of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B e-mail: invs@mail.ru

УДК 519.688

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.033

Конечно-элементное моделирование разрушения изгибом плавающей ледовой балки

М.А. Дрепин¹, Р.В. Гучинский^{1,2,3}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, ² «ТМХ Инжиниринг», Санкт-Петербург ³ Институт Проблем Машинovedения РАН (ИПМаш РАН), Санкт-Петербург

Аннотация. Объектом исследования является ледовая балка,двигающаяся с постоянной скоростью на наклонную опору. Цель исследования – расчетно-экспериментальное определение координаты разлома ледовой балки с учетом различных способов моделирования упругого основания и сопоставление с данными модельного эксперимента. Для моделирования взаимодействия ледовой балки с наклонной опорой используется метод конечных элементов. Материалом для разработки численной модели служат данные серии модельных экспериментов. Разработана модель с тремя различными способами моделирования упругого основания: по Винклеру, дискретно распределёнными упругими элементами и при помощи твёрдого тела. Подтверждена эквивалентность всех способов моделирования упругого основания. Рассмотрено два типа контакта между водным основанием и балкой. Определение координаты разлома балки из модельного льда при малых скоростях может быть выполнено в квазистатической постановке без решения динамической задачи. Предложено три способа моделирования упругого основания.

Ключевые слова: Ледовое поле, изгибные напряжения, координата разлома балки, упругое основание, конечно-элементное моделирование.

Finite-element modeling of bending failure of floating ice beam

Mikhail A. Drepin¹, Ruslan V. Guchinsky^{1,2,3}

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, ² TMH Engineering, St. Petersburg, ³ Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS (IPME RAS), St. Petersburg.

Abstract. This paper discusses moving of an ice beam at constant speed onto an inclined support. The purpose of this study was experimental and numerical determination of the ice beam breaking distance, considering various methods of the elastic foundation modeling and comparison with the data of the model experiment. The finite element method is used to model the interaction of an ice beam with an inclined support. Numerical model was based on the data from the series of model experiments. The model with three different methods for modeling an elastic foundation has been developed: according to Winkler, discretely distributed elastic elements and using a rigid body. The equivalence of all the methods of elastic foundation modeling is confirmed. The influence of the type of contact between the water base and the beam on modeling accuracy is analyzed. Determination of the beam breaking distance for model ice beam at low speeds can be performed in a quasi-static formulation without solving the dynamic problem. Three methods are proposed for modeling an elastic foundation.

Key words: Ice field, bending stresses, beam breaking distance, elastic foundation, finite element modeling.

Введение

Ледовые нагрузки на наклонные опоры зачастую являются определяющими при оценке прочности сооружений в арктических районах. Взаимодействие льда и наклонной опоры обычно разделяют на несколько стадий [1]. В случае протяженных сооружений сначала происходит образование разлома ледового поля при изгибе, затем наполнение обломка на сооружение с дальнейшим разрушением поля и образованием вторичных обломков. При этом после появления первой трещины ледовое поле может еще некоторое время сохранять несущую способность вследствие образования пластического шарнира [2].

В случае сосредоточенных наклонных опор разрушение может происходить путем образования как радиальных, так и окружных трещин [3, 4]. Для описания нагрузок на наклонные опоры обычно пользуются методами, предложенными Кроасдэйлом и Ральстоном [1, 5], основанными на решении двумерной задачи. Эти методы положены в основу многих нормативных документов [6, 7].

Метод Кроасдэйла предполагает суммирование нагрузок, соответствующих различным стадиям взаимодействия льда и сооружения. Первая компонента нагрузки связана с образованием

трещины при изгибе с формированием первого обломка. Эта компонента нагрузки определяет его длину.

Для совершенствования методов оценки ледовых нагрузок в случае протяженных сооружений могут быть использованы испытания ледовых балок, деформирование и разрушение которых также сводится к плоской задаче. Ледовые балки используются, в том числе для обустройства ледовых переправ, в этом случае применяется поверхностное армирование, существенно повышающее несущую способность балки [8]. Из-за высокой стоимости натурных испытаний актуальным является численное моделирование взаимодействия льда и сооружения.

Для моделирования разрушения ледовых балок применяется как метод конечных элементов, так и метод дискретного элемента [9, 10]. При этом если скорость движения льда мала, может быть использован квазистатический подход для моделирования разрушения и описания нагрузок на наклонную опору [11].

Цель настоящей работы состоит в расчетно-экспериментальной оценке координаты разлома ледовой балки.

Описание эксперимента

В Крыловском ледовом бассейне была проведена серия экспериментов по определению точек разлома ледового поля. При испытании наклонная опора двигалась на балку, вырезанную из ледового поля, со скоростью 2,5 мм/с. Результаты регистрировались камерой с целью определения координаты разлома и формы трещины. После образования трещины в балке испытание завершалось. В ходе экспериментов были определены координаты разлома балки, значения модуля Юнга и средней прочности на изгиб льда. Параметры эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры эксперимента

Лёд	
Средняя прочность на изгиб, КПа	22,8
Модуль Юнга, МПа	24,2
Толщина, мм	50
Длина, мм	1500
Ширина, мм	300-525
Опора	
Угол наклона, °	53
Ширина, мм	700

В эксперименте испытывалось 12 балок шириной от 300 до 525 мм. На рис. 1 и 2 показаны балки шириной 525 мм и 467 мм после проведения испытания.

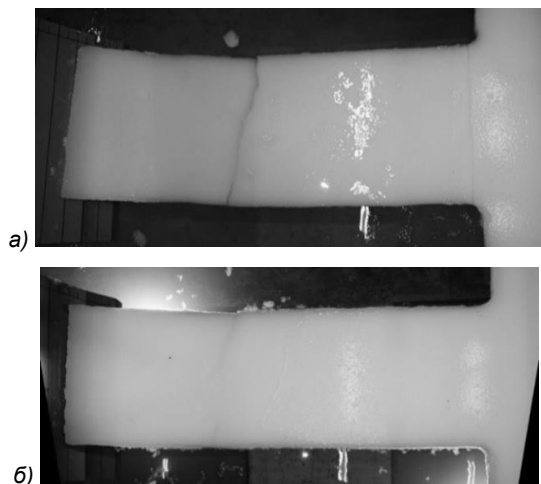


Рис. 1. Балка после разлома, а - эксперимент №1, б - эксперимент №2

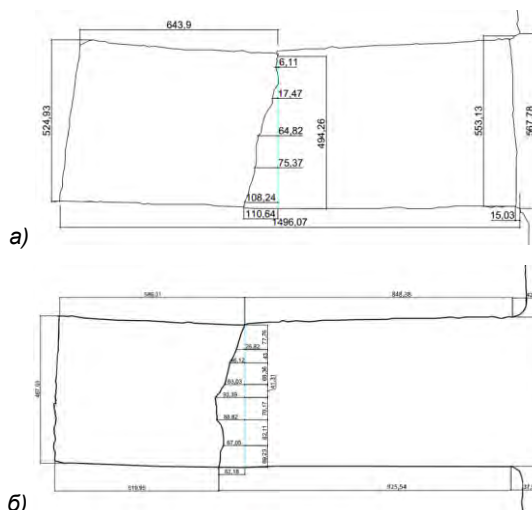


Рис. 2. Эскиз балки и разлома, а - эксперимент №1, б - эксперимент №2

За координату разлома принимается координата, при которой нормальные напряжения превышают среднюю прочность на изгиб. На рис. 2 это координаты 53 см и 52 см, соответственно.

Моделирование разлома балки в статической постановке

При моделировании результатов в квазистатической постановке рассматривалась балка на упругом основании в рамках задачи о плоской деформации. Моделирование выполнялось в программе ANSYS Mechanical. В дополнение к параметрам, указанным в таблице 1, принималось, что коэффициент Пуассона льда равен 0,3, а коэффициент постели упругого основания составляет 10^4 Па/м.

Нагружение осуществлялось перемещением на 25 мм за 1 с. Предполагалось, что трение отсутствует. Граничные условия: заделка на горизонтальных и вертикальных гранях опоры, упругое основание для нижней грани льда и нагружение перемещением для правого конца балки.

Балка была разбита на 21288 элементов, а стальная опора на 2576 элементов. По толщине лёд имеет не менее 20 элементов в любом сечении, сгущение сетки на краях выбрано таким, чтобы размеры элемента не превышали 1 мм. Размер элементов на поверхности опоры вблизи контактной зоны также не превышает 1 мм (рис. 3).

В результате моделирования было определено, что предел прочности достигается в нижнем основании пластины при условном (в рамках квазистатической постановки) времени $t = 0,56$ с. Координата точки разлома при моделировании упругого основания по Винклеру составила 49,6 см. На рис. 4 показаны вертикальные перемещения, а на рис. 5 – нормальные напряжения в направлении горизонтальной оси в момент разлома.

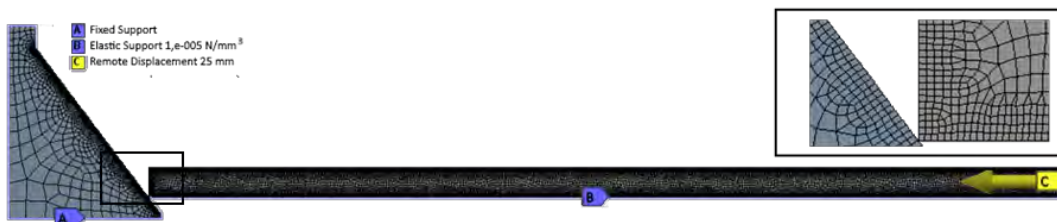


Рис. 3. Конечно-элементная модель и граничные условия

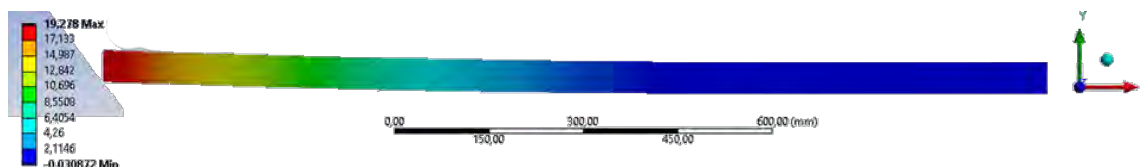


Рис. 4. Вертикальные перемещения при $t = 0,56$ с, мм

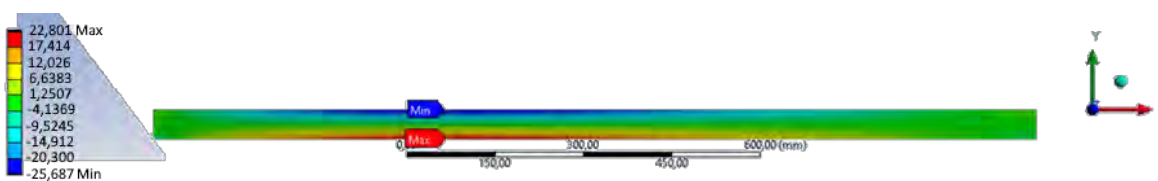


Рис. 5. Нормальные напряжения по X при $t = 0,56$ с, МПа

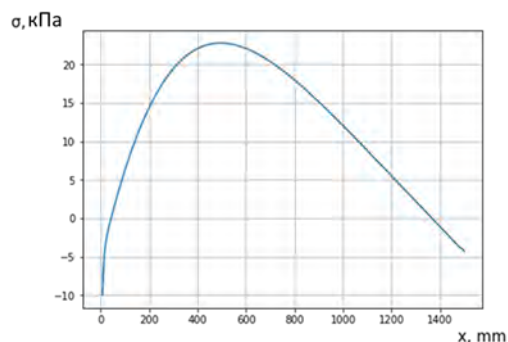


Рис. 6. Нормальные напряжения по X на нижней грани для упругого основания по Винклеру

Распределение напряжений на нижней грани показано на рис. 6. В дальнейшем при моделировании с использованием других способов определения упругого основания предполагалось получение аналогичного графика.

Определение упругого основания

При проведении расчета упругое основание может быть задано несколькими способами. Во-первых, с помощью модели основания Винклера (гипотеза Фусса-Винклера) [12]. В этом случае необходимо задать поверхность основания и соответствующий коэффициент постели. Во-вторых, с помощью равномерно распределенных упругих элементов, имитирующих упругое основание. Для этого определяются узлы соединения пружины с балкой, задается тип упругого элемента и его

линейная жесткость. Величина жесткости упругого элемента:

$$k_{\text{пр}} = L \times \frac{k}{n}, \quad (1)$$

где L – длина балки, k – коэффициент постели, n – количество упругих элементов.

В-третьих, упругое основание может быть представлено телом эквивалентной жесткости. В случае плоской задачи для такого тела задаются высота и модуль Юнга, при этом должно обеспечиваться условие эквивалентности

$$k = E/h, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга материала тела, h – высота тела. Также задаются условия контакта тела и балки и ограничиваются перемещения тела.

Актуальность описания упругого основания несколькими способами связана с ограниченностью возможностей задания упругого основания при решении динамической задачи в ANSYS.

Для определения эквивалентного количества пружин были проанализированы несколько моделей, содержащих от 15 до 300 упругих элементов (пружин), при этом в точке контакта сооружения и балки пружина не устанавливалась (рис. 7). Для определения максимальных напряжений и координаты разлома выполнялось сглаживание результатов с пружинами при помощи быстрого преобразования Фурье (рис. 8).



Рис. 7. Модель с 20 пружинами

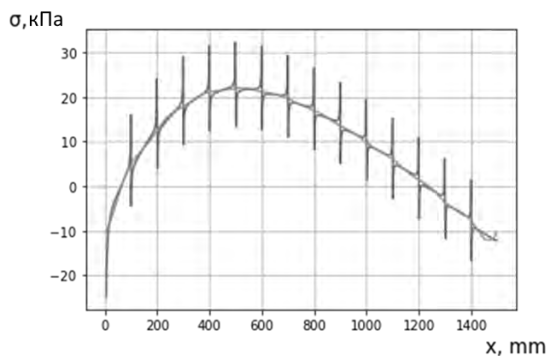


Рис. 8. Распределение напряжений по нижней грани балки для модели с 15 пружинами и сглаженная после БПФ кривая

Результаты расчета напряжений и координаты разлома для разного количества пружин показаны на рис. 9. Пунктиром отмечено значение, полученное для модели основания Винклера. По результатам можно заключить, что для определения координаты разлома с погрешностью менее 1% для данной задачи требуется не менее 15 пружин. Для нахождения напряжений с аналогичной точностью требуется модель, содержащая не менее 30 пружин.

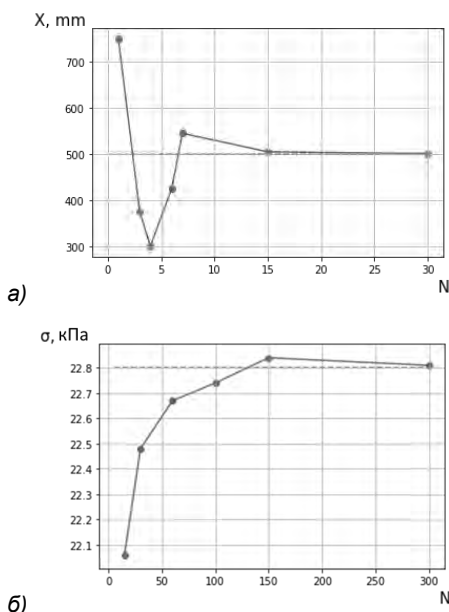


Рис. 9. Координата точки разлома для разного количества пружин (а) и максимальное напряжение в ожидаемый момент разлома (б)

Для проверки возможности задания упругого основания телом эквивалентной жесткости были построены три модели с разными значениями модуля Юнга и высоты. Размер конечных элементов для области контакта составляет 1 мм и соответствует разбиению нижней кромки балки. Вдали от области контакта средний размер конечного элемента составляет 50 мм.

На рис. 10 показаны распределения напряжений по нижней кромке балки для разных размеров тела. На рис. 11 проведено сравнение с результатами по модели Винклеровского основания, подтверждающее справедливость формулы (2). Координата разлома определяется с погрешностью

менее 1 %, а напряжения - с погрешностью менее 2% при любой жесткости тела, моделирующего основание. Отличия в результатах объясняются разной формулировкой контактного взаимодействия в случае основания по Винклеру и используемого контакта No separation, а также концевыми эффектами.

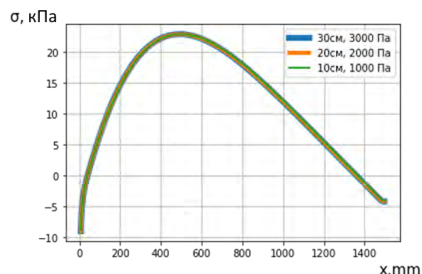


Рис. 10. Напряжения на нижней грани

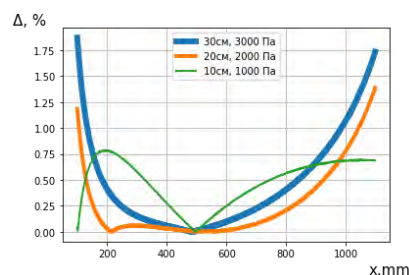


Рис. 11. Относительная погрешность для напряжения на нижней грани

Расчет в динамической постановке

Для трехмерного анализа в явной динамике была построена модель, повторяющая эксперимент с водным основанием высотой 30 см (рис. 12). Расчет выполнялся с помощью решателя ANSYS LS-DYNA [13]. Нижняя грань упругого основания, а также вертикальная и горизонтальная грань наклонной опоры были жестко закреплены. Условия нагружения балки аналогичны используемым в плоской задаче. Использовался жесткий контакт между балкой и основанием. Распределение нормальных напряжений по нижней кромке для разных времён показаны на рис. 13.

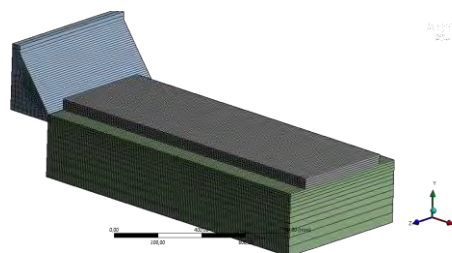


Рис. 12. Конечно-элементная модель для расчёта в 3D постановке

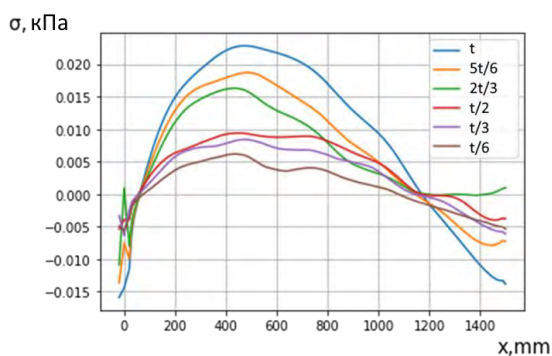


Рис. 13. Распределение нормальных напряжений по нижней кромке, $t=0,68$ с

При решении динамической задачи было уточнено время разлома, которое составило 0,68 с. Координата разлома балки составила 0,47 м. Некоторое уменьшение координаты разлома в сравнении с двумерной задачей объясняется более жестким контактом балки и основания. При использовании данного контакта в статической постановке координата разлома составляет 0,476 м. Отличия значений координат, полученных при решении статической и динамической задачи около 1%, подтверждают возможность использования статического анализа для определения точки разлома балки,двигающейся при малых скоростях.

Обсуждение результатов

Сопоставление координат разлома, полученных расчетом и в эксперименте, приведено на рис. 14. Значения координат разлома, полученные при моделировании, как в статической, так и в динамической постановке, оказываются ниже экспериментальных значений.

При моделировании не использовался вероятностный подход, поэтому детерминированные значения координат, показанные на рис. 16, не отражают рассеяние результатов, наблюдаемое в эксперименте.

Между тем, эпюра распределения напряжений по нижней кромке балки (рис. 10) характеризуется небольшим разбросом напряжений (в пределах 12%) на довольно протяженном (0,3-0,7 м) участке (рис. 6). В работе [14] показано, что на прочность ледовых

балок при чистом изгибе, а также на локализацию разрушения влияют дефекты и включения в структуре льда. Поэтому при сходных номинальных напряжениях в широкой области координат местные напряжения, определяемые концентрацией напряжений, могут оказаться больше в зонах с меньшими номинальными напряжениями. Таким образом, концентрация напряжений у дефектов и включений определяет разброс результатов эксперимента. Также известно, что механические свойства модельного льда, например, модуль Юнга, могут характеризоваться широким диапазоном [15]. Поэтому значение координаты разлома, полученное при моделировании, меньше, чем экспериментальное медианное значение, может объясняться заниженными значениями модуля Юнга, полученными в эксперименте. Направлением для дальнейшей работы является уточнение значения модуля Юнга и рассмотрение влияния дефектов и включений на процесс разрушения льда.

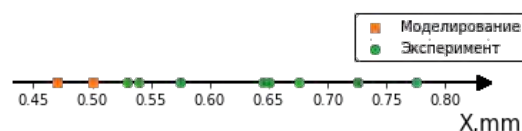


Рис. 14. Значения точки разлома для моделирования и эксперимента

Заключение

При малых скоростях определение координаты разлома балки из модельного льда может быть выполнено в квазистатической постановке без решения динамической задачи.

Упругое основание может моделироваться как основанием Винклера, так и распределенными упругими элементами, при этом для определения координаты разлома их необходимо не менее 15. Также основание может быть представлено контактирующим со льдом упругим телом с соотношением модуля Юнга и высоты, равным коэффициенту постели упругого основания.

Разброс значений координат точек разлома, наблюдаемый в эксперименте, связан с влиянием на начало процесса разрушения включений и дефектов в структуре льда.

Литература

1. Croasdale K. R., Cammaert A. B. An Improved Method for the Calculation of Ice Loads on Sloping Structures in First Year Ice. Proceedings of 1st RAO Conference. 1993. Pp. 161-168
2. Sodhi D.S. Vertical penetration of floating ice sheets. International Journal of Solids and Structures. 1998. Vol. 35. No. 32-32. Pp. 4275-4294.
3. Frederking R., Timco G.W. Quantitative Analysis of Ice Sheet Failure Against an Inclined Plane. Journal of Energy Resources Technology. 1985. Vol. 107. Pp. 381-387.
4. Lu W.J., Lubbad R., Loset S. Out-of-plane failure of an ice floe: radial-crack-initiation-controlled fracture // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 119. Pp. 183-203.
5. Ralston T. D. Ice force design considerations for conical offshore structures // 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. St. Johns. Canada. 26-30 September. 1977. Vol. 2. Pp. 741-752.
6. ISO 19906. Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. ISO. Geneva. Switzerland. 2010. 465 p.
7. СНиП 38. 13330. 2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) М.: 2012. 116 с.
8. Козин В. М., Васильев А. С., Земляк В. Л., Ипатов К. И. Исследование предельного состояния ледяного покрова в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2019, № 61, 61-69

9. Mohammadafzali, S., Sarracino, R., Taylor, R., Stanbridge, C. W., Marchenko A. Investigation and 3D Discrete Element Modeling of Fracture of Sea Ice Beams // Arctic Technology Conference. 2016. Pp. 333-348.
10. Paavilainen, J., Tuhkuri, J., & Polojärvi, A. 2D combined finite-discrete element method to model multi-fracture of beam structures // Engineering Computations, 26(6). 2009. Pp. 578–598.
11. Shkhinek, K., Uvarova, E. Dynamics of the Ice Sheet Interaction with the Sloping Structure // Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa, Ontario, Canada. Vol. 2. 2001. Pp 639-648.
12. Алехин А.Н. Краткая характеристика моделей грунта // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. Вып. 1. С. 68-75.
13. Ли Лян, Шхинек К.Н. Воздействие льда на откосные сооружения // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1(45). С. 71-79.
14. Barrette P., Jordaаn I. Beam Bending and Fracture Behaviour of Iceberg Ice // National Research Council Program on Energy Research and Development (PERD). 2001. Pp. 4-78.
15. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед физические свойства. Современные методы гляциологии. Ленинград: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.

References

1. Croasdale K. R., Cammaert A. B. An Improved Method for the Calculation of Ice Loads on Sloping Structures in First Year Ice. Proceedings of 1st RAO Conference. 1993. Pp. 161-168
2. Sodhi D.S. Vertical penetration of floating ice sheets. International Journal of Solids and Structures. 1998. Vol. 35. No. 32-32. Pp. 4275-4294.
3. Frederking R., Timco G.W. Quantitative Analysis of Ice Sheet Failure Against an Inclined Plane. Journal of Energy Resources Technology. 1985. Vol. 107. Pp. 381–387.
4. Lu W.J., Lubbad R., Loset S. Out-of-plane failure of an ice floe: radial-crack-initiation-controlled fracture. Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 119. Pp. 183–203.
5. Ralston T. D. Ice force design considerations for conical offshore structures. 4th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. St. Johns. Canada. 26-30 September. 1977. Vol. 2. Pp. 741-752.
6. ISO 19906. Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. ISO. Geneva. Switzerland. 2010. 465 p.
7. SNIP 38. 13330. 2012 Nagruzki i vozdejstviya na gidrotehnicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov) [Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships)].: 2012. 116 p.
8. Kozin V.M., Vasil'ev A.S., Zemlyak V.L, Ipatov K.I. Issledovanie predel'nogo sostojaniya ledjanogo pokrova v uslovijah chistogo izgiba pri usilenii armirujushhimi jelementami [Investigation of the limit state of ice cover under conditions of pure bending when using reinforcing elements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 61. Pp. 61–69
9. Mohammadafzali, S., Sarracino, R., Taylor, R., Stanbridge, C. W., Marchenko A. Investigation and 3D Discrete Element Modeling of Fracture of Sea Ice Beams. Arctic Technology Conference. 2016. Pp. 333-348.
10. Paavilainen, J., Tuhkuri, J., & Polojärvi, A. 2D combined finite-discrete element method to model multi-fracture of beam structures // Engineering Computations, 26(6). 2009. Pp. 578–598.
11. Shkhinek, K., Uvarova, E. Dynamics of the Ice Sheet Interaction with the Sloping Structure. Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Ottawa, Ontario, Canada. Vol. 2. 2001. Pp 639-648.
12. Alekhin A.N. Kratkaja harakteristika modelej grunta [Summary description of soil models]. Academic Bulletin UralNIIPproject RAASN. 2011. № 1. Pp. 68-75.
13. Li Liang, Shkhinek K.N. Vozdejstvie l'da na otkosnye sooruzhenija [Dynamic Interaction between Ice and Inclined Structure]. Magazine of Civil Engineering. 2014. № 1(45). Pp. 71-79.
14. Barrette P., Jordaаn I. Beam Bending and Fracture Behaviour of Iceberg Ice. National Research Council Program on Energy Research and Development (PERD). 2001. Pp. 4-78.
15. Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P. Led fizicheskie svojtva. Sovremennye metody gljaciologii [Physical Properties of Ice. Modern Methods in Glaciology]. Leningrad: Gidrometeoizdat (1980), 384 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Михаил Александрович Дрепин, бакалавр, инженер
Лаборатория фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: mihail.drepin@gmail.com

Mikhail A. Drepin, Undergraduate, engineer of
Laboratory of Fundamental Foundations of Ice Research, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politehnicheskaja, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: mihail.drepin@gmail.com

Руслан Валерьевич Гучинский, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Лаборатория фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: ruslan239@mail.ru

Ruslan V. Guchinsky, Ph.D. (Eng), senior researcher
of Laboratory of Fundamental Foundations of Ice Research, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politehnicheskaja, 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: ruslan239@mail.ru

УДК 620.9:44.41.29

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.034

Упрощенная имитационная модель топливного процессора в составе воздухонезависимых энергетических установок

А.В. Балакин¹, А.Н. Дядик¹, А.С. Кармазин¹, М.В. Ларионов¹, С.Н. Сурин¹¹Концерн «НПО «Аврора»

Аннотация. В статье представлена упрощенная имитационная модель, описывающая работу топливного процессора в составе воздухонезависимой энергетической установки. Рассмотрено блочное моделирование отдельных составляющих ВНЭУ, в частности, высокотемпературного реактора, блока очистки газа от серы и сажи, первого и второго блоков конверсии, сепаратора и регулирующего клапана. Имитационные модели отдельных элементов ВНЭУ позволяют рассчитывать динамические характеристики энергоустановки и создавать алгоритмы управления клапанами подачи водорода в переходных режимах. Теоретические зависимости для определения массовых расходов реагентов, температур и давлений приведены для идеальных газов с целью представления в среде LabVIEW с учетом полученных экспериментальных данных для проведения расчета маневров по регулированию давления на заданных режимах работы ВНЭУ при различных условиях ее работы.

Ключевые слова: воздухонезависимая энергетическая установка (ВНЭУ), упрощенная имитационная модель, топливный процессор (ТП), высокотемпературный реактор (ВТР), блок очистки от серы и сажи (БО), блок конверсии (БК), сепаратор (С), регулирующий клапан (РК), датчик давления (ДД), регулятор давления (РД), привод регулирующего клапана (ПРК), расход газа, парогазовая смесь, давление газа.

Simplified imitation model of fuel processor in composition of air-independent power plants

Alexej V. Balakin¹, Aleksander N. Dyadik¹, Andrej S. Karmazin¹, Mihail V. Larionov¹, Sergej N. Surin¹¹Concern Avrora Scientific and Production Association

Abstract. The article presents a simplified simulation model that describes the operation of the fuel processor as part of an air-independent power plant. Block modeling of the individual components of an air-independent power plant, in particular, a high-temperature reactor, a unit for cleaning gas from sulfur and soot, the first and second conversion units, a separator, and a control valve, is considered. Simulation models of individual elements of an air-independent power plant allow you to calculate the dynamic characteristics of a power plant and create algorithms for controlling hydrogen supply valves in transient conditions. Theoretical dependencies for determining the mass flow rates of reagents, temperatures and pressures are given for ideal gases for the purpose of presentation in the LabVIEW environment, taking into account the obtained experimental data for the calculation of maneuvers for regulating pressure at specified operating modes of an air-independent power plant under various operating conditions. The results of the work are described extremely accurately and informatively. The main theoretical and experimental results, actual data, discovered relationships and regularities are presented.

Keywords: air-independent power plant, simplified imitation model, fuel processor, high-temperature reactor, a unit for cleaning gas from sulfur and soot, conversion unit, separator, control valve, pressure sensor, pressure regulator, control valve actuator, gas consumption, steam-gas mixture, gas pressure.

Введение

В статье [1] рассмотрена математическая модель работы топливного процессора в составе воздухонезависимой энергетической установки (ВНЭУ) с позиций физики протекающих в нем процессов. Основное внимание было уделено работе высокотемпературного реактора (ВТР). Топливный процессор кроме ВТР содержит и другие блоки с конверторами. Функционирование топливного процессора (ТП) происходит при постоянном давлении в контуре ВНЭУ на двух режимах, устанавливаемых оператором. Причем регулирование давления на рабочих режимах ВНЭУ должно происходить без существенных изменений расходов газа на выходе ТП за сепаратором. Решение поставленной задачи производится методом математического моделирования с использованием упрощенной имитационной модели ТП, работающей в реальном времени, представленной в среде LabVIEW с учетом полученных экспериментальных данных.

1. Основные допущения, принимаемые при создании упрощенной имитационной модели топливного процессора

Упрощенная имитационная модель топливного процессора составлена при следующих допущениях.

– Объект управления состоит из пяти последовательно связанных посредством трубопроводов аккумуляторов массы парогазовой смеси, включающих высокотемпературный реактор (ВТР), блок очистки от серы и сажи (БО), среднетемпературный (БК1) и низкотемпературный (БК2) конверторы, сепаратор (С).

– Изменение статического давления в каждом аккумуляторе рассчитывается по уравнению Менделеева-Клапейрона для идеального газа [2]. Постоянные времени аккумуляторов ($\tau = V/RT$) определяются по их геометрическим размерам, с учетом экспериментальных сведений по изменению давлений внутри корпусов аппаратов в процессе маневрирования энергоустановки.

– Температура парогазовой смеси в аккумуляторах сохраняется неизменной в процессе маневрирования. Принимаются неизменными также

плотность и газовая постоянная смеси в переходных процессах энергоустановки.

– Относительные расходы парогазовых компонентов, подаваемых в аккумуляторы и отбираемых из них, считаются постоянными величинами, равными $G_{ВТР} = 0,6$; $G_{Б0} = 0,07$; $G_{БК1} = G_{БК2} = 0,21$; $G_C = 0,29$. Отбор газа из блока очистки происходит с началом пуска энергоустановки. Подача технологической воды в конвертеры БК1 и БК2, а также отбор воды из сепаратора производятся по команде из системы управления ВНЭУ.

– Относительная скорость изменения подачи технологической воды в конвертеры $G_{БК1}$ и $G_{БК2}$ может изменяться по экспериментальным данным от 0,13 до 0,007 1/с.

– В предположении несжимаемости газа [3], массовый расход парогазовой смеси в трубопроводах, связывающих аккумуляторы, зависит от площади проходного сечения трубопровода, перепада давлений между аккумуляторами, плотности газа и коэффициента трения, зависящего от критерия Re и относительной шероховатости стенок. Численные величины площадей проходных сечений подбираются таким образом, чтобы на установившихся режимах работы потери давления между аккумуляторами соответствовали экспериментальным данным.

– Регулирование давления газа производится с помощью регулирующего клапана (РК), управляемого регулятором давления по сигналу от датчика давления в ВТР для двух режимов работы, соответствующих относительному давлению в ВТР ($p_{ВТР}$), равному 0,7 и 0,9. Площадь открытия клапана пропорциональна его перемещению.

– Перемещение РК производится электромеханическим приводом STMINI / типовой номер 472, имеющим 6 режимов настройки относительных скоростей его движения $Skor$, изменяющихся в диапазоне $0,00325 \leq Skor \leq 0,026$ 1/с.

– На выходе РК поддерживается относительное давление $p_{РК} = p_{РК0} + \Delta p_{РК} \sin(2\pi t / \tau)$, где $p_{РК0} = 0,45$; $0 \leq \Delta p_{РК} \leq 0,025$; $\tau = 600$ с. Возможны варианты $p_{РК0} = 0,35$ и $\Delta p_{РК} = 0$.

– Площадь проходного сечения РК устанавливается таким образом, чтобы заданный режим работы, соответствующий $p_{ВТР} = 0,7$, поддерживался при неполном открытии РК.

– Не учитывается инерционность и нечувствительность датчика давления.

Выполняются также следующие условия.

– К газам по отдельности и к смеси в целом применимо уравнение состояния идеального газа.

– Скорость движения газового потока на участке подвода теплоты принимается равной нулю, что определяет равенство статических параметров и параметров заторможенного потока в каждом сечении, а также постоянство давления на участке подвода теплоты.

– Благодаря значительному времени пребывания рабочего тела в зоне реакции успевают установиться энергетическое и химическое равновесие.

– При расчете ионизованного рабочего тела не учитывается кулоновское взаимодействие

заряженных частиц, а продукты ионизации также считаются идеальными газами.

– При расчете гетерогенной смеси вводится предположение о наличии температурного равновесия между конденсатом и газом и наличии фазового равновесия, т.е. парциальное давление газовой фазы конденсированного продукта принимается равным давлению насыщенного пара для этого продукта и зависит только от температуры (это также означает, что конденсированные продукты не образуют растворов и расплавов).

– Объемом конденсированных веществ пренебрегают, их термодинамические функции считают зависящими лишь от температуры.

Согласно допущениям, функциональная схема топливного процессора с регулятором давления будет иметь вид, как это представлено на рисунке 1.

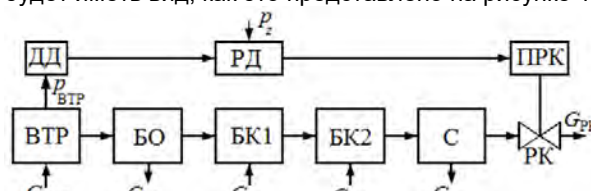


Рис. 1. Функциональная схема топливного процессора с регулятором давления: ВТР – высокотемпературный реактор; БО – блок очистки от серы и сажи; БК1, БК2 – блоки конверсии; С – сепаратор; ДД – датчик давления; РД – регулятор давления; ПРК – привод регулирующего клапана; РК – регулирующий клапан; ГРК – расход парогазовой смеси на выходе РК

2. Уравнения, описывающие работу отдельных блоков топливного процессора ВНЭУ

Для описания процессов тепло и массопереноса используется система уравнений, включающая в себя уравнения неразрывности, изменения количества движения, энергии и сохранения массовой концентрации химических компоненты.

При ламинарном режиме течения уравнения неразрывности и изменения количества движения записываются в форме Навье-Стокса [3, 4], которые для стационарного случая и при отсутствии массовых сил имеют вид (в тензорных обозначениях):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (2)$$

С использованием уравнения неразрывности, выражение (2) может быть переписано в виде:

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (3)$$

В уравнениях (1) и (2) используются индексы i, j и k определяют направления декартовой системы координат $i, j, k = 1, 2, 3$. Величины: u_1, u_2, u_3 – составляющие скорости в направлении соответствующих осей x_1, x_2, x_3 ; p – давление; ρ – плотность; t – время; τ_{jk} – составляющие тензора вязких касательных напряжений:

$$\tau_{jk} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

где μ – коэффициент динамической (молекулярной) вязкости. С учетом уравнения неразрывности член, определяющий касательное трение, может быть записан в виде:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk} = \nu \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j^2}, \quad (5)$$

где $\nu = \mu/\rho$ – коэффициент кинематической вязкости.

В тензорной форме выраженное через полную энтальпию H уравнение энергии записывается в виде:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u_j \frac{\partial H}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} u_j), \quad (6)$$

где q_j – составляющие вектора теплового потока.

С учетом того, что $H = E + p/\rho + u_i^2/2$, где E – внутренняя энергия, уравнение (6) может быть переписано так:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial E}{\partial x_j} = \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (7)$$

Для небольших чисел Маха, как это принято в допущениях к математической модели, (до $M = 0,4$) можно принять $E = \int c_p dT$, где c_p – теплоемкость жидкости, и с учетом закона теплопроводности Фурье $q_j = \lambda \partial T / \partial x_j$, где λ – коэффициент теплопроводности. Тогда

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + \frac{\nu}{c_p} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial u_3}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial y} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2};$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} + u_3 \frac{\partial u_2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2};$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_3}{\partial x} + u_2 \frac{\partial u_3}{\partial y} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2};$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_1 \frac{\partial T}{\partial x} + u_2 \frac{\partial T}{\partial y} + u_3 \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\nu}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) +$$

$$+ \frac{\nu}{c_p} \left[2 \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_3}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} \right)^2 \right];$$

$$\frac{\partial p m_l}{\partial t} + \rho u_1 \frac{\partial m_l}{\partial x} + \rho u_2 \frac{\partial m_l}{\partial y} + \rho u_3 \frac{\partial m_l}{\partial z} = D_l \left(\frac{\partial^2 m_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_l}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m_l}{\partial z^2} \right) + R_l.$$

Для описания турбулентных течений используют уравнения Рейнольдса, которые получают путем осреднения во времени уравнений Навье-Стокса. Замыкание уравнений Рейнольдса осуществляется способом, основанным на применении в дополнение

В формуле (8) введен критерий Прандтля, равный $Pr = c_p \mu / \lambda = \rho c_p \nu / \lambda$, и определяющий меру отношения молекулярного и конвективного переноса теплоты.

Горение топлива в ВТР состоит из нескольких реакций, протекающих со скоростями, зависящими от концентрации реагирующих компонентов. Уравнения материального обмена и гомогенного горения отражают процесс горения.

Для гомогенной реакции суммарное изменение концентрации компоненты l складывается из изменения концентрации за счет реакции и изменения концентрации за счет как конвективного, так и диффузионного переноса молекул в выделенный объем среды. Объединение закона действующих масс с уравнением материального обмена дает уравнение, устанавливающее картину изменения концентрации за счет реакций в объеме, конвективного переноса и диффузии.

При наличии поля скорости, уравнение сохранения массовой концентрации химической компоненты m_l записывается в виде:

$$\frac{\partial T p m_l}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial m_l}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_l \frac{\partial m_l}{\partial x_j} \right) + R_l, \quad (9)$$

где: $\partial/\partial t(\rho m_l)$ – скорость изменения массы компонента в единице объема; $\rho u_j m_l$ – конвективный поток компоненты, переносимый общим полем течения ρu_j ; D_l – коэффициент диффузии; R_l – член, обозначающий скорость образования компоненты в единице объема, обусловленного химической реакцией.

Система уравнений (1), (3), (8) и (9) вместе с соотношениями (4) и (5) включает в себя зависимости относительных неизвестных: u_1 ; u_2 ; u_3 ; p ; T ; m_l . Величины u_1 , u_2 , u_3 – составляющие скорости в направлении осей $x = x_1$; $y = x_2$; $z = x_3$ декартовой системы координат, представляются в форме уравнений Навье-Стокса:

к системе Рейнольдса уравнений для рейнольдсовых напряжений и иных характеристик турбулентности.

Уравнение для кинетической энергии турбулентных пульсаций k записывается так:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \left[v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{jk} k \right] \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} - \varepsilon - \frac{\partial}{\partial x_j} v \frac{\partial}{\partial x_k} \left[v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{jk} k \right].$$

Скорость диссипации энергии пульсаций ε определяется уравнением:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_t}{\sigma \varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \left[v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где v_t – коэффициент турбулентной вязкости, имеющий ту же размерность, что $v_t = C_\mu k^2/\varepsilon$; $\varepsilon = C_\mu k^3/L$. Здесь σ_ε – аналог турбулентного числа Прандтля для скорости диссипации энергии пульсаций; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – постоянные величины, подлежащие определению. По данным ряда работ, постоянные моделирования имеют следующие значения: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44 \div 1,59$; $C_{\varepsilon 2} = 1,9 \div 2,0$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3 \div 1,47$. К системе уравнений, описывающих поведение динамических характеристик потока, добавляется уравнение энергии в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (10)$$

где $Pr_T = v_t/a_T$ – турбулентное число Прандтля (введено по аналогии с молекулярным числом Прандтля Pr), что завершает процедуру замыкания системы уравнений. Обычно считают, что $Pr_T = 0,9$. Данные эксперимента свидетельствуют, что для пристеночных течений Pr_T изменяется от $0,6 \div 0,7$ во внешней части пограничного слоя до $1,5$ вблизи стенки.

Уравнение сохранения химической компоненты с учетом турбулентного переноса может быть выведено и записано по аналогии с уравнением энергии:

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial m_l}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D + \frac{\mu_T}{Pr_D} \right) \frac{\partial m_l}{\partial x_j} + R_l, \quad (11)$$

где Pr_D – диффузионное число Прандтля.

Известно большое количество экспериментальных данных по Pr_D при больших значениях Re_T . Эти значения находятся в интервале $0,5 - 1,0$.

Член R_l определяет скорость образования химической компоненты в результате химической реакции в единице объема газовой смеси. Эта величина определяется химической кинетикой, которая дает соотношения, связывающие R_l с местным давлением, температурой и концентрацией. Для случая, когда компонента l образуется в результате реакции компоненты j с компонентой k , соответствующее выражение может быть записано в упрощенном виде:

$R_l = K_1 p m_j \exp(-E_1/RT) + K_2 p^2 m_j m_k \exp(-E_2/RT)$, где K_1 , E_1 , K_2 , E_2 – постоянные величины.

В действительности системы химических реакций, рассматриваемые в инженерной практике достаточно сложны. Кроме того, термодинамические и переносные свойства, а также константы химического равновесия для подавляющего числа компонент известны приближенно. В этом случае приходится идеализировать модель реального процесса с учетом наиболее существенных факторов. С учетом этих упрощающих допущений, имитационная модель течения газа в ТП может быть представлена в виде уравнений гидравлики

(аэродинамики) для отдельных блоков. Рассмотрим эти составные блоки, расположенные в соответствии с рисунком 1.

Высокотемпературный реактор

$$\frac{dp_{BTP}}{dt} = \frac{G_{BTP}^{BX} - G_{BTP}^{BbIX}}{\tau_{BTP}};$$

$$G_{BTP}^{BX} = G_{ТОП} + G_{КИС} + G_{ТВ}^{BTP};$$

$$G_{BTP}^{BbIX} = \xi F_{BTP}^{BbIX} \sqrt{2\rho_{CM} \Delta p_{BTP}};$$

$$\Delta p_{BTP} = p_{BTP} - p_{БО}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$G_{BTP}^{BX}, G_{BTP}^{BbIX}$ – массовые расходы парогазовой

смеси на входе и выходе ВТР ($G_{BTP}^{BX} = G_{BTP}$ на схеме, изображенной на рисунке 1);

$G_{ТОП}, G_{КИС}, G_{ТВ}^{BTP}$ – массовые расходы топлива, кислорода и технологической воды в ВТР;

$p_{BTP}, p_{БО}$ – давления парогазовой смеси;

ρ_{CM} – плотность парогазовой смеси;

τ_{BTP} – постоянная времени аккумулятора ВТР;

F_{BTP}^{BbIX} – площадь проходного сечения трубопровода, связывающего ВТР и БО;

ξ – коэффициент истечения (обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления – трения и местного) Для технических гладких круглых труб при $Re = 4 \times 10^3 \div 10^5$ (турбулентный режим течения среды) может использоваться формула Блазиуса [5]: $\xi = 0,3164 Re^{-0,25}$. Для более широкого диапазона, при $Re = 4 \times 10^3 \div 10^{12}$ применяется формула Филоненко [5]:

$$\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}.$$

Коэффициент сопротивления трения при изотермическом ламинарном течении в круглой трубе ($Re < 2300$) рассчитывается по формуле [5]: $\xi = 64/Re$.

Блок очистки от серы и сажи

$$\frac{dp_{БО}}{dt} = \frac{G_{BTP}^{BbIX} - G_{БО}^{BbIX} - G_{БО}^{ОТБ}}{\tau_{БО}};$$

$$G_{БО}^{BbIX} = \xi F_{БО}^{BbIX} \sqrt{2\rho_{CM} \Delta p_{БО}};$$

$$\Delta p_{БО} = p_{БО} - p_{БК1}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$p_{БК1}$ – давление в парогазовой смеси в БК1;

$G_{БО}^{BbIX}$ – массовый расход парогазовой смеси на выходе БО;

$G_{\text{БО}}^{\text{ОТБ}}$ – массовый расход серы и сажи, отбираемой из БО ($G_{\text{БО}}$ на схеме, изображенной на рисунке 1);
 $F_{\text{БО}}^{\text{ВЫХ}}$ – площадь проходного сечения трубопровода, связывающего БО и БК1;
 $\tau_{\text{БО}}$ – постоянная времени аккумулятора БО.

Первый блок конверсии

$$\frac{dP_{\text{БК1}}}{dt} = \frac{G_{\text{БО}}^{\text{ВЫХ}} - G_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}} + G_{\text{ТВ1}}^{\text{ВХ}}}{\tau_{\text{БК1}}};$$

$$G_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}} = \xi F_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}} \sqrt{2\rho_{\text{СМ}} \Delta P_{\text{БК1}}};$$

$$\Delta P_{\text{БК1}} = P_{\text{БК1}} - P_{\text{БК2}}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$P_{\text{БК2}}$ – давление в парогазовой смеси в БК2;

$G_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}}$ – массовый расход парогазовой смеси на выходе БК1;

$G_{\text{ТВ1}}^{\text{ВХ}}$ – массовый расход технологической воды, подаваемой в БК1 ($G_{\text{БК1}}$ на схеме, изображенной на рисунке 1);

$F_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}}$ – площадь проходного сечения трубопровода, связывающего БК1 и БК2;

$\tau_{\text{БК1}}$ – постоянная времени аккумулятора БК1.

Второй блок конверсии

$$\frac{dP_{\text{БК2}}}{dt} = \frac{G_{\text{БК1}}^{\text{ВЫХ}} - G_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}} + G_{\text{ТВ2}}^{\text{ВХ}}}{\tau_{\text{БК2}}};$$

$$G_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}} = \xi F_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}} \sqrt{2\rho_{\text{СМ}} \Delta P_{\text{БК2}}};$$

$$\Delta P_{\text{БК2}} = P_{\text{БК1}} - P_{\text{С}}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$P_{\text{С}}$ – давление парогазовой смеси в сепараторе;

$G_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}}$ – массовый расход парогазовой смеси на выходе БК2;

$G_{\text{ТВ2}}^{\text{ВХ}}$ – массовый расход технологической воды, подаваемой в БК2 ($G_{\text{БК2}}$ на схеме, изображенной на рисунке 1);

$F_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}}$ – площадь проходного сечения трубопровода, связывающего БК2 и сепаратор;

$\tau_{\text{БК2}}$ – постоянная времени аккумулятора БК2.

Сепаратор и регулирующий клапан

$$\frac{dP_{\text{С}}}{dt} = \frac{G_{\text{БК2}}^{\text{ВЫХ}} - G_{\text{РК}} - G_{\text{ОТБ}}}{\tau_{\text{С}}};$$

$$G_{\text{РК}} = \xi h_{\text{РК}} F_{\text{РК}}^{\text{max}} \sqrt{2\rho_{\text{СМ}} \Delta P_{\text{РК}}};$$

$$\Delta P_{\text{РК}} = P_{\text{С}} - P_{\text{РК}};$$

$$P_{\text{РК}} = P_{\text{РК0}} + \Delta P_{\text{РК}} \sin(2\pi t / T_{\text{ПЕР}}).$$

Здесь введены следующие обозначения:

$P_{\text{РК}}$ – давление газа за регулирующим клапаном;

$P_{\text{РК0}}$ – базовое давление за РК;

$\Delta P_{\text{РК}}$ – амплитуда колебаний давления за РК;

$T_{\text{ПЕР}}$ – период колебаний давления за РК;

$G_{\text{РК}}$ – массовый расход газа через РК;

$G_{\text{ОТБ}}$ – массовый расход воды, удаляемой в сепараторе;

$F_{\text{РК}}^{\text{max}}$ – максимальная площадь проходного сечения РК;

$h_{\text{РК}}$ – относительное перемещение РК;

$\tau_{\text{С}}$ – постоянная времени аккумулятора С;

Предложенная упрощенная имитационная модель, описывающая аэродинамические процессы в топливном процессоре, позволяет выполнять расчеты динамики энергетической установки с получением водорода в высокотемпературном реакторе с дальнейшей очисткой газа от серы и сажи.

Заключение

Рассмотренная упрощенная имитационная модель, описывающая работу топливного процессора в составе воздухонезависимой энергетической установки, включает несколько отдельных блоков со своими математическими зависимостями. Это модель высокотемпературного реактора, блока очистки газа от серы и сажи, первого и второго блоков конверсии, сепаратора и регулирующего клапана. Полученные математические зависимости в своей основе опираются на основополагающие законы термодинамики и гидромеханики - уравнения Менделеева-Клапейрона и Навье-Стокса для несжимаемых жидкостей, к которым относятся подвижные газы при умеренных числах Маха. Использование принципа несжимаемости для описания движения газа в элементах контура топливного процессора оправдано, поскольку величина числа Маха не превышает 0,4, а газ принят идеальным, что допустимо для упрощенной математической модели. Коэффициенты гидродинамических сопротивлений в уравнениях принимались на основе экспериментальных данных, полученных в процессе испытаний на стенде. Представленный метод математического моделирования с использованием упрощенной имитационной модели топливного процессора, способен описывать работу энергоустановки в реальном времени, и в дальнейшем может быть представлен в среде LabVIEW с учетом полученных экспериментальных данных для проведения расчета маневров по регулированию давления на заданных режимах работы ВНЭУ при различных условиях ее работы.

Литература

1. Дядик А.Н., Кармазин А.С. Моделирование основного режима работы топливного процессора// Морские интеллектуальные технологии. СПб, № 4 (38), т. 1. 2017. С.106 –113.
2. Архаров А.М., Афанасьева В.Н. Теплотехника: Учебник для втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 712 с.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. – 824 с.
4. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.

5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

References

1. Dyadik A.N., Karmazin A.S. Modelirovanie osnovnogo rezhima raboty toplivnogo processora [Modeling the main mode of operation of the fuel processor]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. SPb, № 4 (38), t. 1. 2017. pp.106 – 113.
2. Arharov A.M, Afanas'eva V.N. Teplotekhnika. Uchebnik dlya vtuzov [Heat engineering: Textbook for technical colleges]. – 2-eizd., pere-rab. idop. M. – Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2004. p. 712.
3. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied (science) gas dynamics]. M.: Nauka, 1969. p. 824.
4. Povh I.L. Tekhnicheskaya gidromekhanika [Technical hydromechanics]. L.: Mashinostroenie, 1976. p. 504.
5. Kirillov P.L., YUr'ev YU.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory) [Handbook of thermal-hydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)]. M.: Energoatomizdat, 1990. p. 360.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алексей Васильевич Балакин, кандидат технических наук, зам. директора проектного центра спецтемадика – начальник отдела 731, АО «Концерн «НПО «Аврора» 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15, e-mail: mail@avrorasystems.com

Александр Николаевич Дядик, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Теплофизических основ судовой энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dyadik@rambler.ru

Андрей Сергеевич Кармазин, инженер 3 категории, АО «Концерн «НПО «Аврора», 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15, e-mail: andrew.karmazin@mail.ru

Михаил Владимирович Ларионов, начальник лаборатории «Моделирование и алгоритмическое обеспечение ЭУ и МРТК», АО «Концерн «НПО «Аврора», 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15, e-mail: mail@avrorasystems.com

Сергей Николаевич Сурин, кандидат технических наук, зам. генерального директора – директор по спецтемадике и автоматизации ЯЭУ, АО «Концерн «НПО «Аврора», 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15, e-mail: mail@avrorasystems.com

Alexej V. Balakin, Ph.D. (Eng.), deputy director project center of special subjects, head of department 731, Concern Avrora Scientific and Production Association, Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation, e-mail: mail@avrorasystems.com

Aleksander N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, head of the Department of thermophysical basics of marine engineering, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation, e-mail: dyadik@rambler.ru

Andrej S. Karmazin, engineer of the 3rd category, Concern Avrora Scientific and Production Association, Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation, e-mail: andrew.karmazin@mail.ru

Mihail V. Larionov, head of the laboratory "modeling and algorithmic support of power plants and marine robotic complexes", Concern Avrora Scientific and Production Association, Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation, e-mail: mail@avrorasystems.com

Sergej N. Surin, Ph.D. (Eng.), deputy general director, director of special subjects and automation of nuclear power plants, Concern Avrora Scientific and Production Association, Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation, e-mail: mail@avrorasystems.com

УДК 528.854

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.065

Локализация и исключение бликов на изображениях поверхности моделированного льда

И.А. Белянов¹, П.Н. Звягин¹¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Изображения, получаемые при проведении экспериментов в ледовом бассейне, как правило, содержат многочисленные блики от средств искусственного освещения и естественных источников света. Вследствие зернистой структуры моделированного льда, в рамках одного блика яркие пиксели чередуются с более темными. Такие дефекты изображений препятствуют их автоматическому распознаванию. В статье предложены способы локализации данных дефектов и алгоритм их исключения с восстановлением изображения. Метод локализации замещаемой области основан на использовании функции концентрации пикселей с высокими значениями интенсивности. Алгоритм восстановления изображения основан на итеративном применении методов интерполяции и анизотропной диффузии. Эффективность предложенного способа продемонстрирована на примере восстановления изображений поверхности моделированного льда, приготовленного по технологии Fine Grain в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра (Санкт-Петербург).

Ключевые слова: лед, изображение, локализация дефекта, интерполяция, сглаживание.

Localization and elimination of glare in images of model ice surface

Iliia A. Belianov¹, Petr N. Zvyagin¹¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

Abstract. Images obtained during experiments in an ice tank as a rule contain a lot of glare from artificial lighting and photo equipment. Due to the grainy structure of model ice, bright pixels alternate with darker ones. Therefore, such defects prevent automatic recognition of images. The article suggests the method for localization of light spots on the surface of model ice as well as the algorithm for their elimination and image restoration. The method of area replacement is based on the use of high intensity pixel concentration function and delta concentration function. The image reconstruction algorithm is based on iterative application of interpolation and anisotropic diffusion methods to the part of an image with localized light spot. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by the example of restoring images of the surface of simulated ice prepared in accordance with the Fine Grain technology in the ice tank of the Krylov State Research Centre (Saint Petersburg).

Key words: ice, image, defect localization, interpolation, smoothing.

Введение

Модельный эксперимент в ледовом бассейне является в настоящее время основным способом проверки ледовых качеств проектируемых судов и морских сооружений до постройки этих объектов. Современные ледовые опытовые бассейны действуют в России, Финляндии, Германии, Китае. Новый ледовый бассейн Крыловского государственного научного центра [1] открыт в Санкт-Петербурге в 2014 году. Его чаша длиной 110 метров и шириной 10 метров в ходе экспериментов освещается большим числом источников света, расположенных на потолке, на буксировочных тележках и на дне бассейна, под водой. Наблюдать за подводной частью испытываемой модели в новом ледовом бассейне КГНЦ возможно через окна, расположенные на дне бассейна и в его бортиках. В ходе проведения экспериментов широко используется фото и видеофиксация происходящих процессов разрушения льда, возникновения обломков и их расположения после прохода модели. Тем не менее, интерпретация и анализ полученных изображений, как правило, проводятся вручную вследствие недостаточного развития методов анализа изображений с моделированным льдом. Несмотря на существенную контрастность моделированного льда по отношению к воде, имеются следующие особенности, препятствующие успешному применению стандартных методов распознавания:

- яркие блики и отсветы на поверхностях льда и воды как от применения фотовспышки, так и от используемых в ходе эксперимента источников освещения;

- низкая контрастность трещин во льду при плотном соприкосновении обломков;

- снижение контрастности обломков моделированного льда при их притапливании водой.

Перечисленные проблемы видны, например, на изображении, приведенном на рис. 1 [2], сделанном в ледовом бассейне университета Аалто в г. Эспоо (Финляндия). На этом рисунке, на переднем плане, видно яркое световое пятно блика на поверхности моделированного льда.

Аналогичные особенности имеют и изображения, сделанные в ледовом бассейне КГНЦ (рис. 2а и 2б). При этом если на рис. 2а блик образовался в результате применения фотовспышки, то источником бликов на рис. 2б является штатное световое оборудование ледового бассейна.

Помимо крупных пятен бликов, образованных в результате направленного света, для изображений моделированных льдин характерно наличие мелких локальных бликов, расположенных вдоль контура льдины. Такие блики возникают вследствие отражения света частицами разрушенного льда, рассеянными по краю льдины и по поверхности воды вдоль этого края. В отличие от крупных бликов, рассеянные блики малого размера могут быть исключены методами подавления шума [3].



Рис. 1. Моделированный лед и его обломки на поверхности ледового бассейна университета Аалто, Финляндия Zhou et al., 2013 [2]

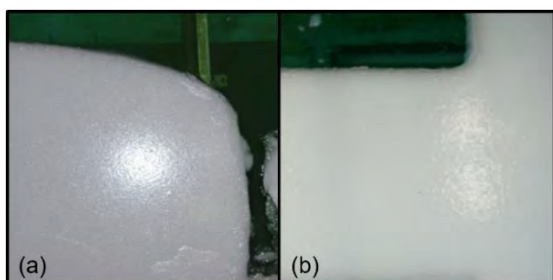


Рис. 2. Блики и отсветы на поверхности моделированного льда в ледовом бассейне КГНЦ: а) блик от фотовспышки; б) блики от стационарных источников освещения

В ледовом бассейне КГНЦ применяется моделированный лед, изготовленный преимущественно по технологии Fine Grain (FG). Эта технология приготовления льда была предложена в Финляндии [4] в 1980-х годах, и в настоящее время также используется в ледовых бассейнах компании Aker Arctic и университета Аалто (Финляндия). По этой технологии, при приготовлении льда на протяжении длительного времени происходит равномерное распыление над поверхностью бассейна ледяных гранул, которые затем смерзаются, образуя ледяное поле нужной толщины.

Вследствие гранулированной структуры, для описания оптических свойств поверхности ледового поля особенно удобной оказывается теория, предложенная в работе [5]. Данная теория, разработанная первоначально для снега, рассматривает сферические частицы, которые способны как отражать свет, так и преломлять его при наличии эффекта внутреннего отражения.

Гранулированная структура поверхности приводит к итоговой неравномерности блика, наличию темных участков, эффекту «зернистости». Интенсивное отражение падающего света отдельными частицами льда может наблюдаться даже на значительном удалении от центра блика. Все это осложняет локализацию области, занятой бликом.

Локализация блика на поверхности моделированного льда

Локализация блика состоит в расположении маски вокруг некоторого центра (x_c, y_c) . Обозначим Ω множество пикселей, занятых такой маской. В

случае бликов на поверхности моделированного ледового поля (рис. 1 и 2), удобно применять сферическую или эллиптическую маски (рис. 3а). Для уточнения положения Ω будем применять составные маски, сформированные из круговых секторов с центрами в (x_c, y_c) (рис. 3б).

Отметим, что в нашем случае нет необходимости в поиске наименьшей по площади маски, охватывающей блик. Наоборот, для успешного замещения блика интерполяционным методом с последующим сглаживанием стоит присоединить к маске некоторый участок за пределами границ блика. Таким образом, можно представить всю область Ω в виде суммы двух непересекающихся областей $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$. Здесь Ω_1 обозначено множество пикселей, непосредственно принадлежащих блику, а Ω_2 – множество дополнительных присоединенных пикселей, определяющих удобную для аналитического описания области Ω .

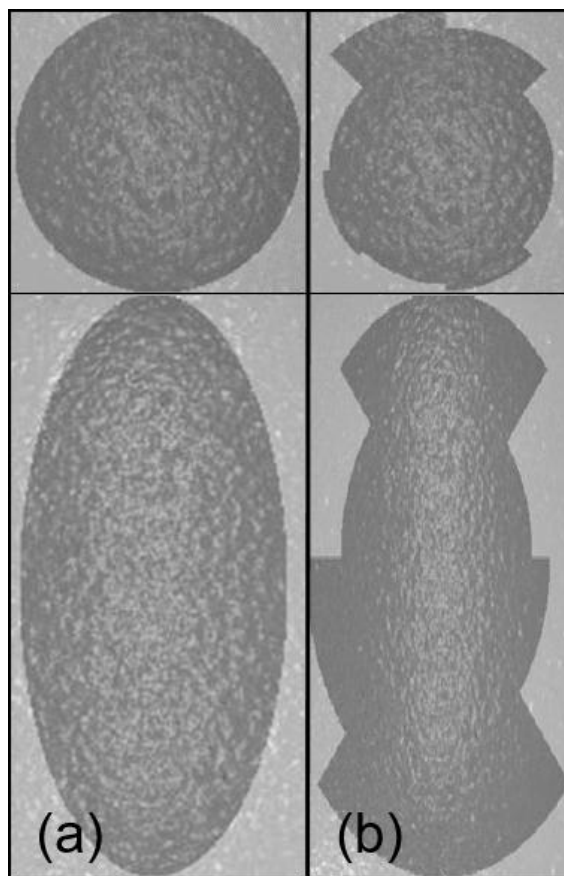


Рис. 3. Примеры масок, примененных для локализации бликов: а) круглая и эллипс; б) сегментные

В настоящей работе будем рассматривать изображения в градациях серого, при этом значение интенсивности I пикселя (x, y) будет изменяться в пределах 0-255. Будем определять, принадлежит ли пиксель множеству Ω_1 , сравнивая его интенсивность с некоторым пороговым значением \hat{I} . Концентрацию бликовых пикселей на области Ω определяется как:

$$C(\Omega) = \frac{|\Omega_1|}{|\Omega|} \quad (1)$$

где при помощи $|A|$ обозначена мощность множества A .

Используя (1), определим концентрацию $C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I})$ бликовых пикселей на расстоянии R от центра (x_c, y_c) как отношение пикселей с интенсивностью большей \hat{I} , находящихся не далее R от (x_c, y_c) к общему числу таких пикселей. Величина $C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I})$ очень удобна для аналитического описания круглых бликов. На рис. 4 показан пример графиков этой величины, построенный для круглого блика на рис. 3а, для разных значений порога интенсивности \hat{I} . Можно трактовать значение концентрации $C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I})$ как вероятность обнаружить пиксель с интенсивностью более \hat{I} в анализируемом круговом секторе радиусом R .

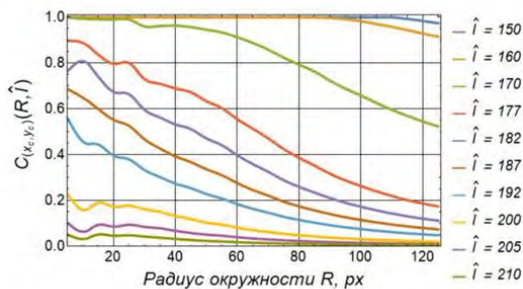


Рис. 4. График величины $C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I})$

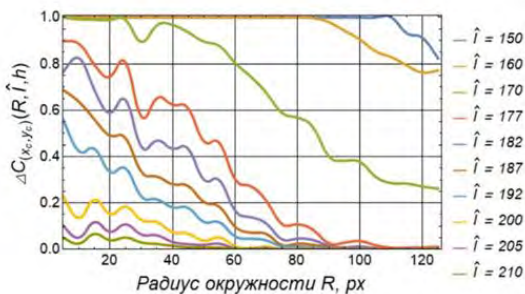


Рис. 5. График величины $\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h)$

Дополнительной величиной для описания бликовых областей является $\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h)$, представляющая собой концентрацию бликовых пикселей в кольцевом секторе шириной h с внешним радиусом кольца равным R , $h < R$. Таким образом:

$$\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h) = C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}) - C_{(x_c, y_c)}(R - h, \hat{I}) \quad (2)$$

На рис. 5 показан пример графиков $\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h)$ для разных значений порога интенсивности \hat{I} , но одинаковой шириной колец $h = 5$. Аналогично

предыдущей величине, трактовать значение $\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h)$, можно как вероятность обнаружить пиксель с интенсивностью более \hat{I} в круговом кольце.

Определение границ маски Ω будем осуществлять, задавая пороговое значение $C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I})$ или $\Delta C_{(x_c, y_c)}(R, \hat{I}, h)$ с использованием значения \hat{I} , найденного с осреднением интенсивности по некоторому контрольному участку поверхности моделированного льда. Соответствующее значение R будет определять внешнюю границу маски или ее сектора.

Метод исключения локализованного блика

К настоящему времени известен ряд способов правдоподобной реконструкции замещаемой области изображения [6]: геометрические, текстурные и на основе нейросетей. В геометрических методах интенсивность различных каналов цвета изображения предполагают дважды дифференцируемой по каждому из направлений функцией. С учетом данного предположения для продолжения геометрических структур изображения на замещаемую область используют интерполяцию этих функций. Такие методы эффективны для распространения плавных перепадов цвета, но стоит отметить их низкую эффективность в восстановлении текстур. Геометрические методы считают локальными, поскольку для закрашивания области используются свойства изображения на границах этой области. Например, алгоритм, предложенный в [7], продемонстрировал хорошие результаты для небольших областей, имеющих вид разреза. Этот алгоритм совмещает в себе интерполяцию с одновременным сглаживанием путем анизотропной фильтрации. Далее мы применим его для замещения областей, занятых бликами.

При текстурном закрашивании текстура моделируется как двумерная вероятностная графическая модель, в которой значение каждого пикселя обусловлено его окружением. В таких методах [8] для поиска подходящего значения пикселя в области закрашивания может быть проверено все изображение. Недостатком методов моделирования текстур является их низкая эффективность при замещении областей, содержащих контуры или линейные структуры.

Для настройки нейросетевых моделей реконструкции изображений необходимо иметь большой банк данных, получение которого для рассматриваемой задачи является затруднительным.

Для замещения областей на поверхности моделированного льда, занятых бликами, предложим синтетический алгоритм, использующий метод интерполяции из [7] и анизотропную фильтрацию из [9], [10].

Интерполяция изображения на интересующей области позволяет восстановить линии изофот, то есть – кривых, соединяющей пиксели одной и той же интенсивности. Обозначим матрицу интенсивности изображения в градациях серого как $I^n(x, y)$, где x и y – координаты пикселя, n – номер итерации.

Обозначим \vec{N} вектор, касательный к изофоте в точке (x, y) . Определим его как вектор, ортогональный градиенту интенсивности, а именно:

$$\vec{N}(x, y) = (-I_y^n(x, y), I_x^n(x, y)) \quad (3)$$

В практической реализации частные производные интенсивности $I_x^n(x, y)$ и $I_y^n(x, y)$ будем вычислять по формулам:

$$I_x^n(x, y) = I^n(x + 1, y) - I^n(x, y) \quad (4)$$

$$I_y^n(x, y) = I^n(x, y + 1) - I^n(x, y) \quad (5)$$

Обозначим $L^n(x, y)$ вторую производную интенсивности на итерации n , определяемую как:

$$L^n(x, y) = I_{xx}^n(x, y) + I_{yy}^n(x, y) \quad (6)$$

где частные вторые производные $I_{xx}^n(x, y)$ и $I_{yy}^n(x, y)$ будем оценивать при помощи формул:

$$I_{xx}^n(x, y) = I_n(x - 1, y) - 2I_n(x, y) + I_n(x + 1, y) \quad (7)$$

$$I_{yy}^n(x, y) = I_n(x, y - 1) - 2I_n(x, y) + I_n(x, y + 1) \quad (8)$$

Рассмотрим меру $\overline{\delta L^n}$ гладкости интенсивности I :

$$\overline{\delta L^n} = (L^n(x + 1, y) - L^n(x - 1, y), L^n(x, y + 1) - L^n(x, y - 1)) \quad (9)$$

Пусть Ω является областью, которую нужно заместить. Осуществим последовательность в n итераций по замещению значений интенсивности недостающих пикселей, согласно формуле:

$$I^n(x, y) = I^{n-1}(x, y) + \varepsilon \beta^n(x, y) |\nabla I^n(x, y)| \quad (10)$$

где ε – параметр, контролирующий скорость изменения матрицы интенсивности, $\beta^n(x, y)$ определяется как результат скалярного произведения градиента второй производной и нормализованного касательного вектора к изофоте:

$$\beta_n(x, y) = \frac{\overline{\delta L_n}(x, y) \cdot \vec{N}_n(x, y)}{|\vec{N}_n(x, y)|} \quad (11)$$

а $|\nabla I_n(x, y)|$ представляет собой модуль вектора максимального пространственного изменения, который (в зависимости от знака $\beta^n(x, y)$) можно посчитать как:

$$\begin{cases} \sqrt{(I_{xbm}^n)^2 + (I_{xfm}^n)^2 + (I_{ybm}^n)^2 + (I_{yfm}^n)^2}, & \text{если } \beta^n(x, y) > 0 \\ \sqrt{(I_{xbM}^n)^2 + (I_{xfM}^n)^2 + (I_{ybM}^n)^2 + (I_{yfM}^n)^2}, & \text{если } \beta^n(x, y) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

В последней формуле нижние индексы b и f частных производных по x и y означают тип

применяемой разностной формулы: $I_i^n(i) = I^n(i) - I^n(i - 1)$ или $I_i^n(i) = I^n(i + 1) - I^n(i)$ соответственно (i – координата x или y); m и M – минимум или максимум соответственно между данной производной и нулем.

Представим ниже псевдокод, реализующий интерполяцию на области Ω :



Рис. 6. Псевдокод интерполяционного замещения области Ω

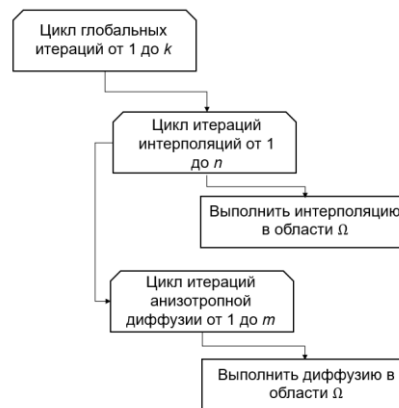


Рис. 7. Псевдокод алгоритма реставрации области моделированного льда Ω , занятой бликом

В качестве второй компоненты метода замещения бликов на поверхности моделированных льдин будем использовать анизотропную диффузию [10]. Применение этой компоненты позволит осуществить сглаживание результата интерполяции на области Ω , при этом сохраняя основные значимые линии. Это является особенно удобным при реставрации областей, находящихся на краях ледовых объектов, что является распространенным случаем в практике анализа изображений, полученных в ледовом бассейне.

При обработке полноразмерных изображений анизотропная диффузия требует существенных вычислительных затрат [9], но при применении современных вычислительных машин хорошо подходит для целей сглаживания небольших областей Ω .

Таким образом, реставрация области Ω в нашем подходе осуществляется путем итеративного преобразования значений интенсивности пикселей этой области.

Итоговый метод замещения области Ω состоит из цикла глобальных итераций и двух вложенных циклов: для интерполяции и для сглаживания результата интерполяции при помощи анизотропной диффузии. Обозначим k число глобальных итераций, n – число итераций интерполяции и m – число итераций анизотропной диффузии. Псевдокод предлагаемого алгоритма по замещению области Ω , занятой бликом и прилегающими к ним пикселями, представлен на рис. 7.

Результаты работы алгоритма

Приведем примеры применения предложенного алгоритма для исключения локализованных бликов на изображениях поверхности моделированного льда. На рис. 8а и 8б показаны результаты замещения областей под масками, показанными на рис. 3а и 3б соответственно. Использовались следующие параметры: $\varepsilon = 0.001$; $n = 15$; $m = 2$; $k = 45$.

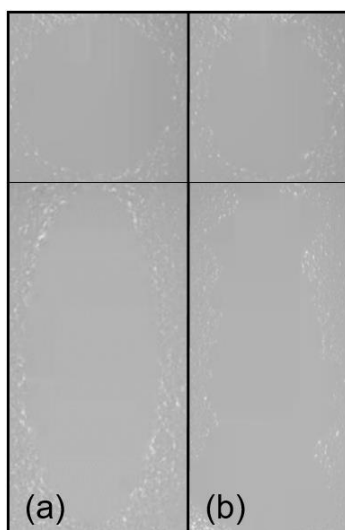


Рис. 8. Результаты замещения бликов на поверхности моделированного льда: а) – замещение круглой и эллипсоидной области на рисунках 3а; б) – замещение секторной областей на рисунках 3б;

Для приведенных результатов можно отметить следующее: интенсивность на замещенных участках соответствует таковой для присутствующей на данных изображениях поверхности моделированного льда; на замещенных участках воспроизведен перепад интенсивности, связанный с общей освещенностью; остаточные рассеянные светлые зерна по краям замещаемой области не воспроизведены внутри нее.

На рис. 9а показан синтетический блик, поставленный на границе воды с обломком моделированного льда, а на рис. 9б представлен результат замещения этой области при помощи

предложенного алгоритма. Использовались следующие параметры: $\varepsilon = 0.001$; $n = 15$; $m = 2$; $k = 45$. Из результата видно, что граница области корректно воспроизведена в замещаемой области.

Нами применялось значение коэффициента ε , равное 0.001 с целью уменьшения искажений со стороны шумов изображения. При больших значениях ε возрастало влияние помех по краям маски на результат интерполяции. Для восстановления областей, занятых бликами, к одним и тем же участкам была применена неоднократно операция интерполяции. В то же время, для сглаживания результата интерполяции при помощи операции диффузии было достаточно всего лишь однократного или двукратного применения.

Для получения визуально удовлетворительного результата с плавным переходом интенсивности на замещаемой области требовалось осуществить значительное число k глобальных циклов алгоритма.

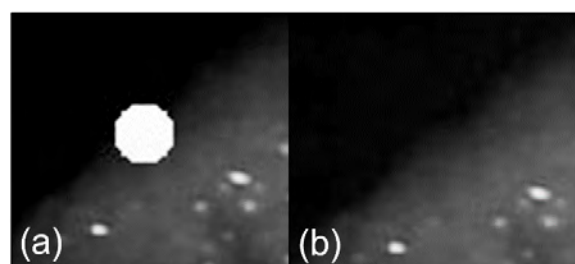


Рис. 9. Результаты замещения синтетического дефекта на границе обломка моделированного льда: а) – исходное изображение с дефектом; б) – обработанное алгоритмом

Заключение

Зернистая структура поверхности моделированного льда, приготовленного по технологии Fine Grain, затрудняет локализацию границ бликов и отсветов. Для решения этой проблемы в данной работе предложен способ формирования масок, состоящих из круговых и эллиптических секторов различного радиуса. Этот способ позволил успешно локализовать блики от фотовспышки и светильников с отражателями круглой формы. В качестве метрики, оценивающей распространение блика от его центра, использована функция концентрации пикселей со значением интенсивности выше порогового.

Предложенный в статье алгоритм, состоящий из итеративного применения интерполяции и сглаживания, продемонстрировал свою эффективность в реконструкции крупных областей с бликами, в том числе – расположенных рядом с границами ледовых объектов. При этом на замещаемом участке восстанавливались как интенсивность пикселей, характерная для моделированного льда, так и линии раздела сред.

Благодарности

Работа выполнена как часть проекта 0784—2020—0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Литература

1. Timofeev, O. Y., Sazonov, K. E., & Dobrodeev, A. A. (2015). New ice basin of the Krylov State Research Centre. In Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC (Vol. 2015-January). Lulea University of Technology.

2. Zhou, L., Riska, K., von Bock und Polach, R., Moan, T., & Su, B. (2013). Experiments on level ice loading on an icebreaking tanker with different ice drift angles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 79–93.
3. Звягин П.Н., Степанов М.А., Звягина Т.Л. 2018. Распознавание изображений моделированного льда при помощи метода разрастания. Журнал «Морские интеллектуальные технологии» №4-1(42), с.229-236.
4. Wilkman G, Leiviskä T. 2013. Forty-three years of ice model testing in Finland. In Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, Espoo, Finland.
5. Bohren, C. F., & Barkstrom, B. R. (1974). Theory of the optical properties of snow. *Journal of Geophysical Research*, 79(30), 4527–4535.
6. Fedorov V., Facciolo G., Arias P. Variational framework for non-local inpainting //Image Processing On Line. – 2015. – Т. 5. – С. 362-386.
7. Bertalmio M. et al. Image inpainting //Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 2000. – С. 417-424
8. Criminisi A., Pérez P., Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting //IEEE Transactions on image processing. – 2004. – Т. 13. – №. 9. – С. 1200-1212.
9. Шошин И. С. Применение анизотропного фильтра Перона-Малика в задаче распознавания посадочной площадки //Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. – 2017. – №. 1 (20).
10. Perona, P., & Malik, J. (1990). Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(7), 629–639.

References

1. Timofeev, O. Y., Sazonov, K. E., & Dobrodeev, A. A. (2015). New ice basin of the Krylov State Research Centre. In Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC (Vol. 2015-January). Lulea University of Technology.
2. Zhou, L., Riska, K., von Bock und Polach, R., Moan, T., & Su, B. (2013). Experiments on level ice loading on an icebreaking tanker with different ice drift angles. *Cold Regions Science and Technology*, 85, 79–93.
3. Zvyagin P.N., Stepanov M.A., Zvyagina T.L. 2018. Model ice images recognition by the region growing method. The journal "Marine intellectual technologies" №4-1(42), с.229-236.
4. Wilkman G, Leiviskä T. 2013. Forty-three years of ice model testing in Finland. In Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, Espoo, Finland.
5. Bohren, C. F., & Barkstrom, B. R. (1974). Theory of the optical properties of snow. *Journal of Geophysical Research*, 79(30), 4527–4535.
6. Fedorov V., Facciolo G., Arias P. Variational framework for non-local inpainting //Image Processing On Line. – 2015. – Т. 5. – С. 362-386.
7. Bertalmio M. et al. Image inpainting //Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 2000. – С. 417-424
8. Criminisi A., Pérez P., Toyama K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting //IEEE Transactions on image processing. – 2004. – Т. 13. – №. 9. – С. 1200-1212.
9. Shoshin I. S. Employing the Perona – Malic anisotropic filter for the problem of landing site detection //Vestnic Concerna VKO Almath-Antey. – 2017. – №. 1 (20).
10. Perona, P., & Malik, J. (1990). Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(7), 629–639.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Андреевич Белянов, лаборант Лаборатории фундаментальных основ ледотехнических исследований, студент 4-го курса высшей школы физики и технологий материалов, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: belyanov_ia@spbstu.ru

Iliia A. Belianov, Laboratory assistant of Laboratory of ice engineering research fundamentals, 4th grade student of the Higher school of physics and materials technology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St.Petersburg, e-mail: belyanov_ia@spbstu.ru

Петр Николаевич Звягин, Кандидат технических наук, доцент, заведующий Лабораторией фундаментальных основ ледотехнических исследований, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, e-mail: icelab@spbstu.ru

Petr N. Zvyagin, Ph.D. (Eng), assistant professor, Head of Laboratory of ice engineering research fundamentals, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St.Petersburg, e-mail: icelab@spbstu.ru



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

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

e-mail: mit-journal@mail.ru <http://morintex.ru>

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
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 <http://morintex.ru> из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И.

Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А.В., Рыбников Н.И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**