

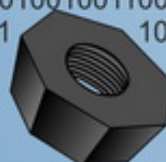
МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110 ISSN 2588-0233 (on line)
 0100011011000001101101100010100100111010011100110100111010011010100 ISSN 2073-7173 (print)
 11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
 01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
 11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001
 10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
 01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
 11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
 010100011011101001000100111011000010110011101010011101001100010101 № 4 часть 2 2024
 110101100001010111101001010011011010101100010110100011000010100111 № 4 part 2 2024



ТРУДЫ ВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
 11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
 01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
 110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
 10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
 01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 часть 2 2024 Сквозной номер 66

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 (в названии журнала заявлено «морские», т. е. все статьи, в том числе и с интеллектуальной компонентой, должны так или иначе относиться к кораблестроению или, по крайней мере, к исследованиям по морской тематике, что должно быть отражено в статье, аннотации, названии).

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

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, в международную реферативную базу данных Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase.

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 19500 рублей. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в научной электронной библиотеке E-library, в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI) и в Ulrich's Knowledgebase. Для аспирантов публикации бесплатно, если аспирант единственный автор.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

Рубрики журнала

(соответствуют специальностям научных работников номенклатуры ВАК 2022)

- 2.5.18 Проектирование и конструкция судов;
- 2.5.17 Теория корабля и строительная механика;
- 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства;
- 2.5.20 Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные);
- 2.2.11 Информационно-измерительные и управляющие системы;
- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации;
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;
- 2.3.7 Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- 1.2.2 Математическое моделирование и численные методы.

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, бесплатный звонок по России 8 800 201 3897, e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Стоимость номера журнала без доставки 3500 рублей.

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2024



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

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 2 2024 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), Ulrich's Knowledgebase.

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:

- Design and Construction of Ships,
- Theory of Ship and Structural Mechanics,
- Technology of Ship Building. Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production,
- Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary),
- System Analysis, Information Management and Processing,
- Information-Measuring and Control Systems,
- Automation and Control of Processes and Productions,
- Computer Modeling and Design Automation,
- Mathematical Modelling, Numerical Procedures.

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, 2024



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

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург
А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
С.Н. Рюмин, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Члены Редколлегии

В.Г. Бугаев, д.т.н., профессор, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
Е.П. Бураковский, д.т.н., профессор, филиал Военно-морской академии, Калининград
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
В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург
И.И. Костылев, д.т.н., профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург
В.В. Родионов, к.т.н., 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

Председатель

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
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., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта, 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, научный руководитель предприятия, 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



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

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

D.A. Skorokhodov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Solomenko Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

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

S.N. Ryumin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Members of Editorial Staff

V.G. Bugaev, Dr.Sci.(Eng), Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Burakovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, branch of Naval Academy, Kaliningrad, Russia

Yu.A. Vlasov, PhD (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

I.I. Kostylev, professor, Dr.Sci. (Eng), Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

V.V. Rodionov, PhD (Eng.), Senior Research Scientist, 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 chairmen

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

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

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), CEO, 51 CCIS, 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, Science principal, 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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Николай Васильевич Никитин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Алексей Юрьевич Яковлев**, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Борисовна Амбросовская**, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” В.И. Ульянова (Ленина)
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Кирилл Дмитриевич Овчинников**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Анатолий Владимирович Алексеев**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Витальевич Галышев**, доктор технических наук, профессор, Высшая школа энергетического машиностроения Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Малыгин Игорь Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко
- **Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, professor, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
- **Виктор Михайлович Козин**, доктор технических наук, профессор, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
- **Юрий Евгеньевич Ежов**, кандидат технических наук, доцент, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Егор Юрьевич Чебан**, доктор технических наук, доцент, Волжский государственный университет водного транспорта
- **Владимир Николаевич Стаценко**, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет
- **Михаил Вячеславович Хачумов**, кандидат физико-математических наук, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
- **Сергей Алексеевич Огай**, доктор технических наук, доцент, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

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

- **Dmitriy A. Skorohodov**, Dr.Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Nikolai V. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Aleksej YU. Yakovlev**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine technical university
- **Alexander A. Rodionov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical University
- **Elena B. Ambrosovskaya**, Ph.D. (Eng), Associate Professor St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI)
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Kirill D. Ovchinnikov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, St. Petersburg state marine *technical* University
- **Anatolii V. Alekseev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg state marine technical Universit
- **Iurii V. Galyshev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor,) Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Ivan B. Druz**, Dr. Sci. (Eng.), professor, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Igor G. Malygin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
- **Alexander A. Tarantsev**, Dr. Sci. (Eng), professor, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Alexey L. Starichenkov**, Dr. Sci. (Eng), professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
- **Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- **IUrii E. Ezhov**, Ph.D. (Eng), associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Egor Yu. Cheban**, Dr. Sci. (Eng), assistant professor, Volga State University of Water Transport
- **Vladimir N. Statsenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Far Eastern Federal University
- **Mikhail V. Khachumov**, Ph.D. (Phys & Math), Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Sergei A. Ogai**, Dr. Sci. (Eng), associate professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi



ТРУДЫ
ВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

СОДЕРЖАНИЕ	стр.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Мизгирев Д.С., Домнина О.Л., Отделкин Н.С. Направления совершенствования технических средств инженерной защиты окружающей среды на судах речного флота.....	12
Ваганов А.Б., Савинов В.Н., Орлов Ю.Ф., Крайнов А.А., Михеева Т.А. Гармонизация продольной устойчивости и остойчивости экраноплана.....	24
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Ваганов А.Б., Орлов Ю.Ф., Крайнов А.А., Михеева Т.А. Упрощенная методика учёта влияния затопленной газовой струи от движителей экраноплана на аэродинамические характеристики крыла с законцовками в режиме полета у опорной поверхности.....	31
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Мизгирев Д.С., Сугаков В.Г., Гурьянов Н.М. Экспериментальные исследования процессов первичной обработки загрязненных вод гидродинамической кавитацией.....	38
Наумов В.С., Кочнева И.Б., Отделкин Н.С. Интегральная оценка уровня экологической безопасности судна на этапах жизненного цикла.....	48
Щеголева О.А., Бурмистров Е.Г., Плющаев В.И., Федосенко Ю.С. К вопросу об импортозамещении основного технологического оборудования для сборочно-сварочного производства российских верфей.....	53
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Конюков В.Л., Горбенко А.Н., Плющаев В.И., Викулов С.В., Михеева Т.А. Особенности характеристик рабочего колеса турбомашин с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме турбины.....	62
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Бурмистров Е.Г., Валяев А.В., Лукина Е.А., Федосенко Ю.С. Модельно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы поддержки принятия решений при угрозе потери поперечной остойчивости речного пассажирского судна.....	70
Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Маценко С.В., Отделкин Н.С. Идентификация событий при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры.....	79
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ	
Базылев А.В., Мельников М.А., Плющаев В.И., Михеева Т.А. Способы повышения точности позиционирования судов на внутренних водных путях.....	89
Перевезенцев С.В., Плющаев В.И., Мизгирёв Д.С., Матвеев Ю.И., Сугаков В.Г. Проблемы создания судовых электронных журналов.....	98
Бурмистров Е.Г., Кузнецов И.И., Смолин П.А., Федосенко Ю.С. Автоматическое управление сложением лазерных пучков для реализации лучевых технологий высокой мощности в судостроительном производстве.....	107
Бурылин Я.В., Попов А.Н., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Соловьёв А.В. Управление автономным подруливающим устройством.....	114
Костюничев Д. Н., Отделкин Н. С., Липатов И. В., Зименков Д. О., Наумов В.С. Оценка эффективности пыле-ветрозащитных экранов в лабораторных условиях при технологии перегрузки сыпучих грузов навалом.....	121
Платов А.Ю., Платов Ю.И., Никулина М. В., Прокопенко А.С. Применение моделей рейсового планирования работы речных судов на производстве и в тренажерных системах.....	127

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Домнина О.Л., Липатов И.В. Моделирование процессов распространения загрязнения технической солью при аварии судов..... 133

Решетников М.А., Ситнов А.Н., Воронина Ю.Е., Шестова М.В. Исследование влияния строительства мостового перехода через р. Ока (г. Нижний Новгород) на вышерасположенные водоводы с применением математического моделирования руслового потока..... 142

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Цыгута А.Н., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода..... 147

Карташова О.И., Ничипорук А.О., Отделкин Н.С., Федосенко Ю.С. Унифицированная экономико-математическая модель обоснования оптимального количества инфраструктурных объектов воднотранспортного терминала..... 159

Филатов В.И., Астреин В.В., Боран-Кешишьян А.Л., Михеева Т.А. Федосенко Ю.С. Разработка и исследование системы эффективного маневрирования судна курсом для расхождения с судном-целью на основании оптимизационного подхода..... 168

CONTENTS	page
DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS	
Dmitriy S. Mizgiriyov, Olga L. Domnina, Nikolay S. Otdelkin Directions for improving technical means of environmental engineering protection on river fleet vessels.....	12
Alexander B. Vaganov, Vladimir N. Savinov, Yuri F. Orlov, Artem A. Krainov, Tatiana A. Mikheeva Harmonization of longitudinal stability and ship stability of ekranoplan.....	24
THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS	
Alexander B. Vaganov, Yuri F. Orlov, Artem A. Krainov, Tatiana A. Mikheeva A simplified method for accounting for the effect of a flooded gas jet from ekranoplane engines on the aerodynamic characteristics of a wing with wingtips in flight mode at the support surface.....	31
TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Dmitry S. Mizgirev, Valerii G. Sugakov, Nikolai M. Gurianov Experimental studies of the processes of primary treatment of contaminated waters by hydrodynamic cavitation.....	38
Victor S. Naumov, Irina B. Kochneva, Nikolay S. Otdelkin Integrated assessment of the level of environmental safety of the ship at the stages of the life cycle.....	48
Olga A. Shchegoleva, Evgeniy G. Burmistrov, Valery I. Plushaev, Yuri S. Fedosenko On the issue of import substitution of basic technological equipment for assembly and welding production at Russian shipyards.....	53
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Viacheslav L. Konyukov, Alexander N. Gorbenko, Valery I. Plyushchaev, Stanislav B. Vikylov, Tatiana A. Mikheeva Characteristics of the turbomachine impeller with radial blades of symmetrical profile in turbine mode.....	62
SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING	
Evgeniy G. Burmistrov, Alexander V. Valyaev, Evgeniya A. Lukina, Yuri S. Fedosenko Model-based algorithmic support for an automated decision-making system in the event of a potential loss of lateral stability for a river passenger vessel.....	70
Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Sergey V. Macenko, Nikolay S. Otdelkin Identification of events in case of oil spills from ships and transport infrastructure facilities.....	79
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Alexandr V. Bazylev, Mikhail A. Melnikov, Valery I. Plyushchaev, Tatiana A. Mikheeva Methods for improving the accuracy of vessel positioning on inland waterways.....	89
Sergey V. Perevezentsev, Valery I. Plyushchaev, Dmitry S. Mizgirev, Yuri I. Matveev, Valery G. Sygakov Problems of creating electronic ship logs.....	98
Evgeniy G. Burmistrov, Ivan I. Kuznetsov, Pavel A. Smolin, Yuri S. Fedosenko Automatic control of the addition of laser beams for the implementation of high-power beam technologies in shipbuilding.....	107
Yaroslav V. Burylin, Anatoly N. Popov, Sergey I. Kondratiev, Anastas L. Boran-Keshishyan, Alexey V. Soloviev Autonomous thruster control.....	114
Denis N. Kostyunichev, Nikolay S. Otdelkin, Igor V. Lipatov, Danila O. Zimenkov, Victor S. Naumov Evaluation of the effectiveness of dust and wind shields in laboratory conditions with the technology of bulk cargo transshipment.....	121
Alexander J. Platov, Juri I. Platov, Marina V. Nikulina, Andrej S. Prokopenko Application of models of voyage planning of river ships in business and in training systems.....	127

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov Modeling of the processes of spreading technical salt pollution in the event of a ship accident.....	133
Maxim A. Reshetnikov, Aleksandr N. Sitnov, Yulia E. Voronina, Marina V. Shestova Investigation of the impact of the construction of a bridge crossing over the river Oka (Nizhny Novgorod) on the upstream waterways using mathematical modeling of the riverbed flow.....	142

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Lesya I. Golovackaya, Aleksandr A. Sorokin, Anna N. Tsyguta, Andrey E. Platinin, Nikolay S. Otdelkin Implementation of a method for forming a comprehensive assessment of the preference for the selection of ballast water filter components based on the provisions of a fuzzy logical conclusion.....	147
Olga I. Kartashova, Andrey O. Nichiporuk, Nikolay S. Otdelkin, Yuri S. Fedosenko Unified economic and mathematical model for justifying the optimal number of infrastructure facilities of a water transport terminal.....	159
Viktor I. Filatov, Vadim V. Astrein, Anastas L. Boran-Keshishyan, Tatiana A. Mikheeva, Yuri S. Fedosenko Effective Ship's maneuvering system to avoid collision with Target-tracked Ship based on Optimization methodology. Development and Assessment.....	168

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHIPS

Научная статья

УДК 629.5.06

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.054>

Направления совершенствования технических средств инженерной защиты окружающей среды на судах речного флота

Мизгирев Д.С.¹ MizgirevDS@yandex.ru, Домнина О.Л.¹ o-domnina@yandex.ru,

Отделкин Н.С.¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Работа посвящена направлениям развития специальных систем инженерной защиты окружающей среды судов комплексной переработки отходов (СКПО), транзитного и специального флота, а также внесудовых и береговых технических средств.

В статье приведена применяемая в настоящее время в соответствии с международной и Российской нормативной базой классификация судовых отходов, используемые для их переработки и утилизации основные технические средства.

С целью деградации негативного влияния судоходства на окружающую среду предложен ряд направлений модернизации судовых и внесудовых технических средств инженерной защиты окружающей среды.

Рекомендованы пути рационального обращения, повышения качества переработки нефтесодержащих вод и нефтешламов, сточных вод и их осадков. В работе предложены и систематизированы технические решения для предотвращения переноса инвазивных микроорганизмов с судовыми балластными водами. Рассмотрены особенности обращения и утилизации судового мусора, проанализирована очистка дымовых и отработавших газов. Опираясь на результаты проведенного анализа рассмотрены направления рационализации технологий переработки отходов при совместной работе оборудования в едином комплексе с применением синергетического эффекта.

Ключевые слова: инженерная защита окружающей среды, системы комплексной переработки отходов, активированные окислительные технологии, синергетический эффект, модернизация специальных судовых систем, судовые и внесудовые технические средства инженерной защиты окружающей среды.

Для цитирования: Мизгирев Д.С., Домнина О.Л., Отделкин Н.С. Направления совершенствования технических средств инженерной защиты окружающей среды на судах речного флота, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 12—23. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.054

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.054>

Directions for improving technical means of environmental engineering protection on river fleet vessels

Dmitriy S. Mizgiriyov¹ MizgirevDS@yandex.ru, Olga L. Domnina¹ o-domnina@yandex.ru,

Nikolay S. Otdelkin¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru

¹Volga state University of water transport

Abstract. The work is devoted to the areas of development of special systems of engineering environmental protection of ships of integrated waste processing (SCPO), transit and special fleets, as well as off-shore and onshore technical means. The article presents the classification of ship waste currently used in accordance with the international and Russian regulatory framework, and the main technical means used for their processing and disposal. In order to degress the negative impact of shipping on the environment, a number of directions for the modernization of shipboard and off-ship technical means of environmental engineering protection are proposed. The ways of rational treatment and improvement of the quality of processing of oily waters and oil sludge, wastewater and their sediments are recommended. The paper proposes and systematizes technical solutions to prevent the transfer of invasive microorganisms from ship ballast waters. For this purpose, the analysis of the features of the handling and disposal of ship debris was carried out, the cleaning of flue and exhaust gases was analyzed. Based on the result of the analysis, the features of rationalization of waste recycling technologies in the joint operation of equipment in a single complex with the use of a synergistic effect are considered.

Key words: engineering environmental protection, integrated waste recycling systems, activated oxidative technologies, synergetic effect, modernization of special ship systems, marine and off-ship technical means of environmental engineering protection.

For citation: Dmitriy S. Mizgiriyov, Olga L. Domnina, Nikolay S. Otdelkin Directions for improving technical means of environmental engineering protection on river fleet vessels. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 12—23. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.054

Введение

Не смотря на прошедшую пандемию COVID 19, введенные на Российскую Федерацию экономические санкции, усложнение условий работы транспортных предприятий, в настоящее время происходит стабильное увеличение грузо- и пассажироперевозок на внутренних водных путях (ВВП). Вопреки существенному снижению объемов нового судостроения, вызванного как недостатком импортных комплектующих и оборудования, непрекращающимся ростом цен на металлопродукцию, так и возрастающему кадровому голоду [1], судовладельцами выполняется значительный ремонт старого существующего флота, в том числе ввод стоящего на длительном отстое более 10 лет, переоборудование и глубокая модернизация эксплуатирующихся судов под требования рынка перевозок, а также с учетом затрудненной гидрологической ситуации на основных внутренних водных путях (снижение осадки вследствие обмеления). Наблюдается общая тенденция повышения уровня автоматизации и сокращение количества членов экипажей. В угоду потребностям рынка распространено использование флота не только по прямому назначению (перевозки пассажиров и грузов). Так, транзитные пассажирские суда зачастую могут использоваться в качестве стационарных гостиниц, баз отдыха, а грузовые – в качестве накопителей, перегрузочных и паузных площадок, насосных станций, причалов и т.п.

Все чаще, в первую очередь из соображений экономии финансовых, материальных и трудовых ресурсов, на речном флоте применяются самые дешевые сменно-запасные части, нарушаются сроки и объемы технического обслуживания и ремонтных работ, используются низкокачественные горюче-смазочные материалы, зачастую не соответствующие требованиям действующих стандартов – все это вызывает повышенный износ морально и физически устаревшего оборудования (средний возраст эксплуатирующихся судов уже превышает 40 лет), работу на аварийных режимах в качестве основных. Кроме того, оборудование, непосредственно не связанное с обеспечением перевозок грузов и пассажиров, в основном выведено из эксплуатации или демонтировано (зачастую в его перечень попадают технические средства инженерной защиты окружающей среды), что приводит, в ряде случаев, к несанкционированным сбросам. Таким образом, эксплуатация современного речного флота, в большинстве своем, сопровождается значительными объемами выбросов вредных загрязняющих веществ в окружающую среду. Причинами таких выбросов может быть не только в стремление судовладельцев к экономии затрат на эксплуатацию, но и недостатки существующей системы комплексного обслуживания флота (КОФ).

У существующей на ВВП России системы КОФ можно выделить следующие недостатки:

- элементы системы жестко географически привязаны к конкретным населенным пунктам, вследствие чего фактически обслуживаемые участки ВВП ограничены дальностью захода судов-сборщиков;

- количество и состояние технических средств на отдельных участках ВВП ограничено и часто недостаточно или находится в неудовлетворительном состоянии - это приводит к дополнительным простоям судов, дополнительные затраты на промежуточные операции транспортирования или необходимость накопления отходов на борту, что не всегда реализуемо;

- физическое и моральное устаревание ведет к невозможности оперативного обслуживания транзитного флота с учетом меняющейся судоходной, гидрометеорологической обстановки, погодных условий и перераспределения транспортных потоков с учетом меняющейся конъюнктуры рынка.

Перечисленные проблемы системы ведут к значительным финансовым затратам и потере части прибыли у судовладельцев, а также эксплуатирующих флот и занимающимися КОФ организаций.

В настоящее время литература по этому вопросу скудна и недостаточно разработана. Наша цель – на основе классификации различных типов судовых отходов разработать направления совершенствования технических средств инженерной защиты окружающей среды на речном транспорте, изучить различные методы обработки и повышения ценности этих отходов. Такой подход облегчит наши будущие усилия по оцифровке предлагаемых решений.

1. Обзор литературных источников

Идентификация судовых отходов включает в себя классификацию различных типов отходов, образующихся на борту судов, для надлежащего обращения с ними. Это может включать сбор, сортировку, переработку и управление опасными и неопасными отходами [2].

В зарубежных источниках описано, что к судовым отходам относятся все отходы, образующиеся в процессе эксплуатации судна, за исключением остатков груза, и они могут быть разделены на жидкие и твердые отходы. К жидким отходам относятся шламы машинного отделения, состоящие из углеводородных остатков и льяльных вод машинного оборудования, а также сточные воды. Углеводородные остатки образуются в результате очистки топлива и использования масел и смазок в машинном оборудовании, в то время как льяльные воды представляют собой инфильтрированные воды, смешанные с различными веществами. Сточные воды включают воду из туалетов, раковин и других источников. Твердые производственные отходы включают бытовые, специальные промышленные и профессиональные отходы, такие как бытовой мусор, машинные отходы и отходы, связанные с деятельностью на борту [2].

Согласно обобщению зарубежных классификаций и в соответствии с действующей отечественной нормативной базой [2, 3, 4], судовые отходы, делятся на три основные группы:

- а. Твердые (пластиковый мусор, бытовые и пищевые отходы, остатки сухих грузов, металлолом, остатки орудий лова и т.п.).

- б. Жидкие, которые составляют:

- нефтесодержащие воды (НВ);

- сточные воды (СВ), которые в свою очередь делятся на хозяйственно-фекальные (ХФСВ) и хозяйственно-бытовые (ХБСВ);

- балластные воды (БВ);
- нефтеостатки и нефтешламы;
- жидкие остатки химически-активных грузов;
- воды, требующие очистки от специфических загрязнителей (например, химически-, радиационно-загрязненные и т.п.).

в. Газообразные отходы (такие, как отработавшие газы ДВС или газотурбинных установок (ОГ), дымовые газы (ДГ) котлоагрегатов и печей-инсинераторов, выбросы и утечки технологических сред, хладагентов и т.д.).

Необходимо надлежащим образом обращаться с этими отходами, чтобы снизить воздействие на окружающую среду.

В морском судоходстве на суда распространяются международные правила, такие как Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ), которые устанавливают стандарты в отношении отходов обработки на борту. Суда должны быть оборудованы системами очистки отходов для надлежащего обращения с отходами, образующимися на борту [5].

Оценка стоимости углеводородных отходов с судов имеет решающее значение для сохранения водной среды, поскольку эти отходы могут иметь вредные последствия для качества воды и морских и речных экосистем, если с ними не обращаться должным образом. Такое повышение стоимости может превращать эти отходы в полезные продукты, такие как топливо, смазочные материалы, битум и даже газ, тем самым снижая воздействие морских отходов на окружающую среду. Например, это возможно посредством нескольких методов, включая дистилляцию, очистку и превращение в биотопливо, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Примеры успешных проектов, иллюстрирующие практическую реализацию этих методов описаны в зарубежных источниках [6].

Количественные и качественные показатели загрязнения окружающей среды, оказываемые судном из каждой группы выбросов и сбросов, зависят от его типа и назначения, особенностей эксплуатации, текущего технического состояния и возраста.

Технические решения защиты окружающей среды от загрязнения отходами с судов схематично классифицированы на рис. 1.

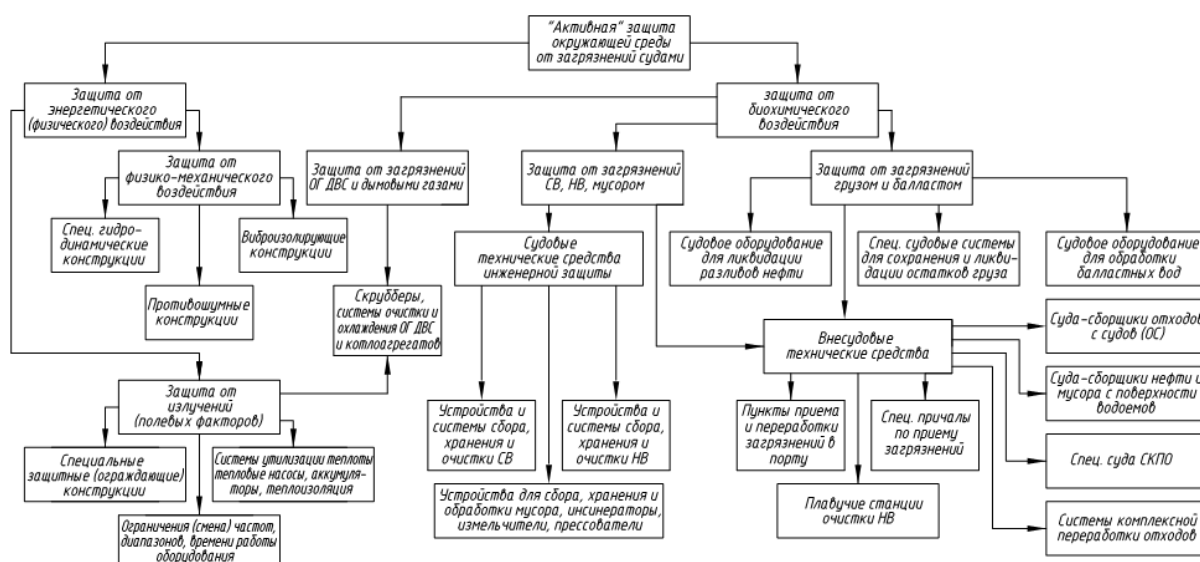


Рис. 1 Технические решения по защите окружающей среды от загрязнения с судов

Поэтому представляется актуальным обзор методов технических средств инженерной защиты окружающей среды на речном транспорте и возможных направлений их развития.

Обзор зарубежных источников показал, что они в основном разрознены и посвящены отдельным способам защиты. Например, в работе [7] представлен обзор применения коагуляции/флокуляции при очистке нефтесодержащих сточных вод (как незаменимой технологии очистки маслянистых сточных вод, поскольку она хорошо зарекомендовала себя, экономична, практична и относительно эффективна), в работе [8] были исследованы и сравнены две гибридные системы фотоокисления, состоящие из двух разных реакторов: фотокаталитического реактора-ультрафильтрации (PR-UF) и фотокаталитического мембранного реактора (PMR) для фотолиза и разделения нефтесодержащей

воды. Очистке с помощью мембранной фильтрации сточных вод в основном в виде трюмных и балластных вод посвящена также работа [9]. В работе [10] показаны возможности очистки сточных вод путем химической коагуляции и осаждения с последующей фильтрацией гранулированным активированным углем (GAC), включая оперативную биорегенерацию отработавших газов облигатной морской бактерией *hydrocarbonoclasticus* (ОНСВ) *Alcanivorax borkumensis* SK2 для снижения затрат на регенерацию GAC.

В работе рассмотрены вопросы предотвращения образования отходов, повторному использованию отходов, их переработке и другие виды восстановления [11]. Этот подход также применим к отходам, образующимся на судах [12].

Есть публикации о том, что, за исключением нескольких крупных компаний, занимающихся морскими круизами, другие не публикуют и не

предоставляют информацию о своих экологических инициативах и практиках [13, 14, 15].

В недавнем обзоре об управлении твердыми отходами [16] было также обнаружено, что этот вопрос мало обсуждается и изучается в научных кругах.

Обобщив зарубежный и отечественный опыт [2-23] приемлемых технических решений по переработке судовых отходов необходимо выделить:

а. Внесудовые средства:

- оборудованные спец. причалы (отходы с которых доставляются для переработки и утилизации на очистные сооружения, мусорные полигоны, а также специализированные предприятия);

- суда-сборщики (осуществляют прием, транспортировку отходов и передачу на спец. причал);

- береговые и плавучие накопители, баржи-амбары;

- плавучие станции очистки НВ;

- суда комплексной переработки отходов (СКПО).

б. Судовые средства, расположенные на борту транзитного плавсредства:

- пакетировочные прессы, печи-инсинераторы системы для сбора, хранения и переработки судового мусора;

- станции очистки НВ (СОНВ);

- станции очистки и обеззараживания СВ (СОСВ);

- станции обработки БВ (СОБВ);

- скрубберы и искрогасители;

- системы утилизации теплоты;

- системы комплексной переработки отходов.

2. Основные направления совершенствования технических средств для предотвращения загрязнений с судов

С целью развития в обществе экологической культуры и качественного сдвига в области охраны окружающей среды необходимо не только развитие индустрии переработки отходов, но и стимулирование на использование наилучших доступных технологий в данной сфере (итоговая резолюция VI Невского международного экологического конгресса стран – членов Совета Европы и ООН, Межпарламентской Ассамблеи СНГ):

Основные конструктивные мероприятия, направленные на снижение вредного антропогенного воздействия судов речного флота на окружающую среду, целесообразные к скорейшей реализации перечислены ниже.

2.1 Переработка и утилизация твердых бытовых и пищевых отходов

В качестве основного направления утилизации твердых отходов на судах целесообразна термическая переработка. Данный способ осуществляется с использованием судовых печей-инсинераторов, а также комбинированных многотопливных котлоагрегатов. Использование последних имеет ряд преимуществ в связи с тем, что несмотря на усложнение конструкции и некоторое удорожание оборудования, в них помимо переработки всех основных видов твердого судового мусора, нефтеостатков, шламов, образованных при работе СОСВ и СОНВ, производится в достаточном количестве тепловая энергия. Последняя может быть

полезно использована для нужд самого судна или превращена в электричество.

В современных конструкциях для термической утилизации твердых отходов в качестве основного технологического процесса выступает пиролиз [18]. При его реализации происходит нагрев перерабатываемой массы в бедной кислородом или бескислородной среде, сопровождающийся химической деструкцией органических веществ. В данном процессе происходит последовательное формирование горючих фракций:

- жидкой (смолистых выделений и масел);

- газовой (паров и горючих газов);

- твердого остатка (углерода).

Применительно к судовым отходам данный процесс имеет ряд особенностей: на первом этапе происходит испарение воды, далее, с ростом температуры, происходит химическая деструкция органических компонентов с образованием жидкой фракции (в основном, смол, масел, различных сложных углеводородов). Необходимо отметить, что с ростом температуры в процессе снижается производство жидкой фракции при росте газообразных составляющих и уменьшении количества твердой.

В общем случае, при реализации процесса пиролиза, также, как и при обыкновенном горении, образуются продукты неполного сгорания углеводородов. Действующей нормативной документацией [24] к наиболее опасным отнесены фураны и диоксины, содержание которых в ДГ жестко ограничено. Данные химические соединения отличаются токсичностью, канцерогенностью, могут вызывать изменение генома живых организмов, образуются при протекании термохимических реакций в диапазоне температур (150...600) °С.

Для предотвращения их образования, в соответствии с действующим законодательством Евросоюза, установлены отдельные требования к конструкции камеры сгорания инсинераторов: во всем объеме горячей зоны все содержащиеся в ней газы должны быть нагреты в течение не менее 2 с как минимум до 850 °С при концентрации кислорода в объеме топки не ниже 6%.

Однако, как показывают современные исследования, для того чтобы произошла полная деструкция 15 регламентируемых наиболее опасных компонентов ДГ, требуется нагрев не менее чем до 1500 °С в течение 6 с при содержании кислорода свыше 15%.

По результатам выполненного патентного поиска и обзора открытых литературных источников определено, что наиболее перспективным к применению в составе СКПО является газогенераторно-пиролизное устройство [19]. Данная конструкция является многотопливным котлоагрегатом, включающим разделенный на отдельные камеры с индивидуальным температурным режимом водоохлаждаемый корпус, а также ряд коллекторов, предназначенных для подачи окислителя, необходимого для протекания реакций на этапах пиролиза (водорода, кислорода, озона, воздуха), вблизи которых расположены экраны, изготовленные из материалов-катализаторов, кроме того, внутри топочного устройства с целью осуществления теплосъема, установлены трубные пучки парообразователей.

Эксперименты по термической утилизации ТБО доказали, что описанная конструкция обеспечивает термический КПД ~ 90%, позволяет достичь образование несгорающего остатка ~ 1% от массы загружаемых отходов, при этом обеспечив эмиссию загрязняющих веществ в ДГ в пределах уровня, установленного [25, 24].

Для использования на СКПО с учетом судовых условий для достижения синергетического эффекта агрегат целесообразно модернизировать:

- с целью утилизации жидких отходов необходимо применение «вихревой» топки. Данный способ в настоящее время довольно широко используется для подготовки и низкотемпературного сжигания низкосортных топлив на стационарных береговых объектах (ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС). Такая технология включает термоконтактную сушку влажного топлива за счет внутренней теплоты его частиц и последующее низкотемпературное сжигание в форсированном кипящем слое. Данный процесс может применяться для переработки шламов СОСВ, СОНВ, биогазовой установки, используемой для переработки осадков СВ с целью исключения из комплекса систем СКПО энергоемкого оборудования для глубокого обезвреживания, что упростит, облегчит и удешевит агрегатную часть при эффективном и экономичном сжигании сухих фракций;

- установка газовых форсунок для сжигания биогаза позволит ускорить разложение твердых фракций на первой стадии пиролиза за счет повышения температуры в топке котлоагрегата;

- применение искусственной газовой смеси (ИГС) за счет принудительного наддува с рециркуляцией ДГ котлоагрегата также позволяет снизить эмиссию токсичных составляющих [18];

- использование селективного некаталитического окисления ДГ для уменьшения образования оксидов азота NO_x . Технология включает впрыск аммиачной воды в высокотемпературную зону камеры сгорания, при этом происходит химическая реакция восстановления NO_x до молекулярного азота, образование водорода и последующее его сгорание с образованием паров воды.

Предлагаемые мероприятия имеют целый ряд преимуществ:

- с экономической точки зрения: мероприятия по модернизации не требуют значительных расходов, вследствие увеличения КПД, сокращаются издержки на топливо;

- технологически: понижение аэродинамического сопротивления улучшает циркуляцию в камере сгорания, стабилизирует циркуляцию при изменении нагрузки на агрегат;

- с точки зрения экологии: обеспечивается полное сгорание нескольких видов отходов в различном агрегатном состоянии при различных режимах работы агрегата (эмиссия NO_x редуцируется до 90%, продукты неполного сгорания – до 100% при всех рабочих значениях нагрузок и коэффициента избытка воздуха, в том числе при пусках).

2.2 Переработка НВ, нефтешламов и нефтеостатков

С целью переработки в комплексе систем СКПО НВ, нефтешламов и нефтеостатков рационально применение объединенных станций очистки СВ и НВ (СОСНВ). В связи с тем, что основные технологии

очистки СВ и НВ во многом схожи и на ряде этапов повторяются, в качестве базы для обозначенного устройства необходимо выбрать СОСВ. Для первичной очистки НВ в подобной СОСНВ необходим сепаратор, отделяющий всплывающие и тонущие нефтепродукты, а также система автоматического замера, регистрации и управления сбросом (САЗРИУС) для контроля качества очищенных вод.

Эффект до 99% при разделении нефти и механических примесей из НВ после отстаивания и усреднения достигается в поле центробежных сил трехпродуктового гидроциклона (эксперименты проводились при участии автора). Кроме того, улучшение качества очистки НВ от растворенных и тонкоэмульгированных нефтепродуктов достигается при малых значениях дозы озона (~ 0,8 г/м³) [17]. Это подтверждает вывод о рациональности применения распространенного существующего судового оборудования для очистки СВ (станций типа «Сток») с целью доочистки слабозагрязненных НВ после сепарации.

Термическая утилизация обезвреженных нефтепродуктов, нефтешламов и нефтеостатков рациональна с использованием судовых котлоагрегатов. При этом необходимо применение водо-топливной эмульсии (ВТЭ) по ряду причин:

- открывается возможность использования теплоты возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при сжигании в котлоагрегатах;

- выравнивание температуры вспышки ВТЭ, содержащей смесь нефтепродуктов сложного состава;

- увеличение пожарной безопасности СКПО за счет минимизации объемов находящихся на борту разнородных нефтепродуктов;

- снижение эмиссии загрязняющих веществ в ДГ за счет полноты сгорания топлива.

Как показывают исследования [19], в составе ВТЭ возможно содержание до 38% воды. Доказано, что коррозионная активность ВТЭ вызывает активный износ топливной аппаратуры ДВС и котлоагрегатов. Таким образом, в качестве ограничивающих показателей качества воды для приготовления ВТЭ установлены характеристики жесткости, уровень pH и содержание взвешенных веществ (ВВ). Установлено, что на развитие коррозии в значительной мере влияет размер глобул, таким образом для гомогенизации ВТЭ рационально использование перспективного процесса обработки – гидродинамической кавитации. Монтаж кавитатора в топливную систему котлоагрегата перед жидкостной форсункой позволит получить ВТЭ с различным содержанием технической воды без расслоения, с глобулами необходимого размера, требуемые для обеспечения полноты сгорания на конкретном режиме работы топочного устройства. Подобное, сравнительно дешевое, решение обеспечит стабильное качество и полноту протекания топочного процесса при сжигании сложных смесей жидких топлив различного состава.

2.3 Переработка СВ

Одним из сравнительно простых с точки зрения реализации путей решения проблемы СВ является использование на судах и береговых объектах

оборотных систем технической воды, имеющих следующие достоинства [27,29]:

- значительное уменьшение объемов сброса СВ в акватории снижает негативную антропогенную нагрузку на биоту водной среды;

- снижается нагрузка на основные элементы системы КОФ, в первую очередь, в районах, закрытых для сбросов и удаленных от специализированных береговых очистных сооружений;

- наблюдается экономия за счет снижения издержек на приготовление воды технического качества из забортной;

- возможно сокращение необходимых для бытовых и технических нужд на борту судна, а также осуществления технологических процессов на предприятиях запасов пресной воды.

Необходимый уровень очистки СВ зависит от целей последующего применения подобных вод. Оборотные системы обычно классифицируют по степени контакта, основные требования к их оборудованию приведены в источниках [21,28].

В случае открытых систем, при применении очищенных и обеззараженных СВ, необходимо

обеспечение безвредности химического состава, органолептических показателей, эпидемической безопасности [21].

Доказана возможность использования очищенных и обеззараженных СВ и в закрытых системах, где установленные показатели качества несколько ниже [21]. В работе [26] показано, что должным образом обработанные СВ не обнаруживают кожно-резорбтивного, общетоксического и отдаленного генетического воздействия.

Особые требования к судовым системам, эксплуатируемым с очищенными СВ, уже прописаны в отраслевой нормативной документации, а также инструкциях и правилах эксплуатации. Однако, в настоящее время еще не установлены показатели качества воды, используемой в составе систем искрогашения, скрубберах и прочем оборудовании для очистки ДГ и ОГ.

Требования к качеству воды, используемой для технических нужд в оборотных системах, сформированные по результатам обзора библиографических источников [18] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Необходимое качество технической воды в оборотных системах водоснабжения

Регламентируемый показатель	Рекомендуемая величина				
	Закрытые системы			Открытые системы	
	Охлаждения	Подпитка котлов	Тепло-снабжения	Балластная	Фановая
Химическое потребление кислорода (ХПК), мг O_2 /дм ³	100	-	-	-	100
Биохимическое потребление кислорода (БПК _{полн}), мг O_2 /дм ³	-	-	-	-	6,0
ВВ, мг/дм ³	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0
Коли-индекс, кол/дм ³	1000	1000	1000	100	100
Растворенный кислород, мг/дм ³	-	0,1	0,1	-	1,0
Запах, баллы	2,0	2,0	2,0	-	2,0
Нефтепродукты, мг/дм ³	20,0	2,0	5,0	5,0	20,0
Водородный показатель, pH	6,5...9,0	8,5...10,0	6,5...9,0	7,5...8,5	6,5...9,0
Жесткость общая, мг-экв/дм ³	0,70	0,04	0,35	-	-
Общее солесодержание, мг/дм ³	200	100	120	-	200
Азот общий, мг/дм ³	-	-	-	-	10,0
Хлориды, мг/дм ³	300	300	300	-	350
Неорганические соединения:					
фосфора, мг/дм ³	-	0,3	-	-	1,5
железа, мг/дм ³	1,0	1,0	1,0	5,0	1,0

Применительно к судовым СВ, классифицируемым по составу загрязнителей на хозяйственно-фекальные СВ (ХФСВ) и хозяйственно-бытовые СВ (ХБСВ), показателями качества очищенной воды регламентированы характеристики:

- биологическая стабильность;
- эпидемиологическая надежность.

Широко применяемые на речных судах СОСВ типов «Сток» и «ОСНВ» реализуют технологическом цикле следующую последовательность процессов:

- отстаивание;
- флотация (озонофлотацию);
- предозонирование и фильтрация на зернистом фильтре;
- финальное обеззараживание СВ озоном.

Обозначенное оборудование было разработано в 80-х годах XX в и, по результатам проведенных испытаний, выявлено несоответствие современным

установленным нормативным требованиям по ряду показателей очищенных СВ. Необходимый уровень глубины очистки в настоящее время достигается только увеличением сверх паспортного норматива дозы активных химических реагентов [17].

Модернизация существующих и проектирование новых СОСВ, а также содержащих их систем комплексной переработки отходов с целью достижения биологической стабильности и эпидемиологической надежности при минимальных затратах должна производиться с использованием активированных окислительных технологий (AOT's) наиболее перспективных типов:

- « O_3 + УФ-излучение (УФИ)»;
- « H_2O_2 + O_3 + УФИ».

По априорным данным, наибольший КПД при использовании озона проявляется в процессе озонифлотации и уровне pH = 5,0 (слабокислая

среда). При сочетании этих факторов нейтрализация очищенных СВ происходит самопроизвольно с образованием CO_2 и щелочных продуктов реакций окисления, что позволяет оказаться на финальной стадии очистки от минеральных реагентов [18].

Согласно исследованиям [26], уровень pH судовых СВ составляет (6,0...8,5), таким образом, для эффективной их очистки требуется подкисление. Эту задачу достаточно легко решить смешиванием в танке СВ загрязненной воды из циклонно-пенных аппаратов (ЦПА) или скрубберов систем искрогашения и очистки ОГ ДВС и ДГ котлоагрегатов. При абсорбции соединений SO_2 и NO_2 в перечисленных устройствах достигается уровень $\text{pH} = 3,5...4,5$. Технически, данное мероприятие легко осуществимо, не требует значительных капитальных вложений, позволит избавиться с достижением полезного эффекта от значительного объема химически загрязненных вод, возникающих в процессе очистки ОГ и ДГ и, кроме того, позволит стабилизировать на высоком уровне процесс очистки СВ.

Обработка СВ кавитацией – второе по значимости направление модернизации СОСВ. Как показали исследования [18], в современных СОСВ данный технологический процесс может использоваться:

- на стадии первичной очистки и обеззараживания;
- при финишной обработке очищенных СВ.

В зависимости от необходимых объемов СВ и прочих ограничивающих факторов данная технология может быть реализована с применением гидродинамических и акустических аппаратов. По результатам проведенных автором экспериментов доказан выраженный синергетический эффект при одновременном применении кавитации и озонирования, что дает возможность отнести обозначенные процессы к АОТ's.

В современных СОСВ для финальной доочистки и обеззараживания рационально применение ламп УФ-И озонобразующих (УФИО). В работах [8, 18] показано, что АОТ's вида « O_3 + УФИ» способствует существенному снижению дозы озона при очистке СВ. Таким образом, в случае одновременного использования окисления в УФИО и кавитации возможно достижение выраженного синергетического эффекта. Использование эффективных озонобразующих ламп в качестве генераторов озона позволит исключить озонаторный агрегат из СОСВ, что не только упростит и удешевит конструкцию, но также повысит надежность и снизит энергопотребление системы в целом.

Немаловажным фактором является и то, что в случае применения очищенных СВ в системах котловой воды и теплоснабжения обязательным этапом обработки выступает умягчение. Здесь следует отметить, что в составе всех современных водогрейных, а также паровых котлоагрегатов штатно устанавливаются умягчительные установки на основе натрий-катионирования. При этом общая жесткость после обработки на подобном оборудовании снижается ниже уровня 0,02 мг-экв/дм³.

2.4 Системы очистки БВ

Как доказывают экспериментальные исследования, проведенные авторами, при проектировании и создании современных СОБВ также рационально применение в регулируемом процессе одновременной обработки гидродинамической кавитацией и окислением примесей БВ озоном. Проявляющийся при данной технологии синергетический эффект позволяет снизить коррозионную активность обработанных БВ в балластных танках судов за счет уменьшения дозировки озона, необходимого для эффективного обеззараживания БВ.

БВ содержат гетерогенные включения различных фракций, разделяющие БВ, как правило, на две фазы.

Таким образом, на первом этапе очистки целесообразно выделение твердой фазы на самоочищающихся короткоцикловых фильтрах. Осадок, образующийся при их промывке (живые организмы, минеральные и прочие загрязнители) действующей нормативной документацией [3,20] не запрещается возвращать обратно в акваторию при приеме БВ.

Современные технологии разделения фильтрованием дисперсных сред связаны с комбинированием как минимум двух физических принципов [18]. Комбинации осаждения и механического фильтрования, осаждения в заторможенном пограничном слое, применение эффектов граничного взаимодействия и т.п. обеспечивают необходимое качество очистки.

При операции дебалластировки повторная фильтрация не требуется, однако также обязательно обеззараживание. При реализации технологии озонирования на данном этапе актуальна проблема точности дозировки и разложения избыточного реагента при эмиссии в окружающую среду. В качестве простого и дешевого решения предлагается использование обработки БВ кавитацией с эжекцией ДГ или ОГ, которые уничтожат остаточные живые организмы за счет изменения уровня pH обрабатываемых БВ до (4,5...5,0). В связи с тем, что при нормальной работе гидродинамический кавитатор обеспечивает стабильную эжекцию жидких и газообразных сред, данное мероприятие выгодно отличается простотой реализации, не требует дополнительных дорогостоящих компрессоров и не вызывает дополнительного аэродинамического сопротивления в газопусковом тракте ДВС и котлоагрегатов.

Реализация СОБВ по описанной технологии при модернизации балластных систем существующих судов затрудняется в связи малым значением напора установленных насосов, находящегося в диапазоне (150...350) кПа, что не достаточно для эффективной работы гидродинамического кавитатора (экспериментально доказано: необходимо $p_p \approx 500$ кПа) [18].

Одним из вариантов решения поставленной задачи является использование струйного насоса - эжектора, успешно эксплуатирующегося в обозначенном диапазоне давлений в комплекте с виброакустическим (ультразвуковым) генератором кавитации. В случае повышенного давления сжатия при ограниченном расходе эжектируемой среды эжектор генерирует устойчивую кавитацию – это

позволяет применить его для реализации описанной выше технологии обработки БВ в СОБВ. Высокоэффективное обеззараживание БВ в этом случае достигается энергетической «докачкой» кавитационных каверн ультразвуком и последующим гарантированным их схлопыванием в рабочей зоне струйного аппарата или примыкающего к нему участка трубопровода СОБВ. Конструктивно, при реализации способа могут быть использованы ультразвуковые генераторы кавитации сравнительно малой мощности, при этом требуемая интенсивность будет достигаться ступенчато установкой ряда одинаковых устройств-излучателей [18, 23].

2.5 Дополнительное оборудование энергетического комплекса

В случае применения ВИЭ на комбинированную судовую энергетическую установку (СЭУ) СКПО или энергетический модуль берегового комплекса систем переработки отходов накладываются особые требования:

- должны быть обеспечены все переходные режимы при вводе в эксплуатацию и выводе из нее отдельных систем и агрегатов, а также комплекса в целом;
- гарантировано надежное энергоснабжение перерабатывающего и, при наличии, движительного комплексов, общесудовые, хозяйственные и бытовые нужды экипажа (обслуживающего персонала);
- организована выдача тепловой и электрической энергии внутренним и внешним потребителям [8].

В основе энергетического комплекса на СКПО рационально использование автономных многотопливных комбинированных котлоагрегатов совместно с паровыми турбинами или поршневыми машинами.

На СКПО высокой производительности, обслуживающих флот смешанного (река-море) плавания и морские суда, а также сравнительно крупных береговых объектах возможно применение турбоагрегатов.

Относительно малые речные СКПО не могут применять паровые турбины с связи с целым рядом негативных особенностей подобных СЭУ:

- невозможность технического обслуживания и ремонта в судовых условиях из-за того, что большинство регламентных работ выполняются исключительно в специализированном цехе;
- необходимость установки на борту судна громоздкого и дорогого понижающего реверс-редуктора с большим значением передаточного числа;
- сложность и дороговизна эксплуатации, а также необходимость специализированного обслуживания высококвалифицированным персоналом;
- неудовлетворительные массогабаритные показатели СЭУ (высокая эффективность агрегатов проявляется при мощностях свыше 1 МВт).

В качестве альтернативы в составе СЭУ здесь выступают поршневые машины:

- они обладают высокой маневренностью, реверсивны;
- гарантируют очень высокую перегрузочную способность, ограниченную прочностью деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма;

- обеспечивают пуск под любой нагрузкой;
- сравнительно просты по конструкции, долговечны и ремонтпригодны в судовых условиях;
- не требуют высокой квалификации обслуживающего персонала.

При этом использование главных паровых поршневых машин возможно на самоходных СКПО в следующих вариантах:

- при прямой передаче мощности на винт;
- в случае применения электродвижения (в комплексе паровая электрогенераторная установка – электродвигатель).

В составе СЭУ речных СКПО целесообразно применение двигателя, основные отличительные особенности которого защищены патентом РФ [22].

Накопление избыточной энергии, генерируемой при работе систем переработки отходов СКПО может осуществляться как для внутренних (судовых) нужд, так и с целью передачи ее внешним потребителям. Практически реализуемыми представляются химические (наработкой топлива), а также гироскопические (маховики и супермаховики) схемы накопления. Основным критерием выбора технологии накопления будет являться требуемая длительность хранения при установленной производительности.

Накопители кинетической энергии (НКЭ) используются с целью аккумуляции энергии на сравнительно малый период времени (до 8 ч) [84]. В качестве примера, НКЭ емкостью 50кВт и энергоемкостью 4 МДж будет иметь массу ~1000 кг, размещаться на площади порядка 0,9 м², и при этом производить до 240 циклов в сутки запасаения/выдачи энергии [8].

Для аккумуляции больших объемов энергии на сравнительно длительное время рационально производить генерирование и хранение водорода. Данный способ может быть использован на крупных СКПО с использованием образующихся в процессе генерации побочных продуктов в перерабатывающем комплексе. В настоящее время уже разработаны и находятся в опытной эксплуатации необходимые для применения на флоте малогабаритные устройства.

Перспективна ячейка Мейера (низкоамперный электролизер), принцип работы которой основан на резонансном эффекте в процессе электролиза воды. Устройство высокой производительности производит достаточно чистые газы (пригодные для сжигания без дополнительной очистки) при относительно малом энергопотреблении. Кроме того, отличается высокой безопасностью за счет особенностей конструкции, исключающей обратную реакцию, работы при атмосферном давлении.

Для сравнительно больших производительностей может быть рекомендован высокотемпературный водородно-кислородный парогенератор, предназначенный для получения высокотемпературного (до 1500°C) пара высокого давления (до 7 МПа). По данным исследовательского центра им. М.В. Келдыша и Объединенного института высоких температур РАН, значение коэффициента рекуперации электроэнергии в системе, содержащей турбоэлектрогенератор с обозначенным устройством, может достигать (40...50) % [19].

По предварительным оценкам, в случае использования обоих устройств в перерабатывающем комплексе СКПО возможно достижение больших значений коэффициента рекуперации (до 60 %) за счет отсутствия промежуточных преобразований тепловой энергии.

Генерируемый при разделении воды в электролизере водород рационально аккумулировать как в газообразном виде компримируя в газгольдеры и баллоны, так и в виде химических или интерметаллических соединений в металлгидридных аккумуляторах [8]. В зависимости от режима работы комплекса накопленный газ можно сжигать в комбинированном котлоагрегате, например, в смеси с биогазом, что за счет снижения температуры горения позволит отказаться от использования специальных топочных устройств, обеспечивая при этом высокий экологический и экономический эффект.

Сопутствующий продукт разложения – кислород необходимо использовать для повышения эффективности генерации озона в озонаторном агрегате или УФИО, либо формировать ИГС для наддува котлоагрегата, как было отмечено ранее.

Исходя из вышесказанного следует, что применение современных взаимодействующих систем СКПО и их отдельных элементов позволит значительно сократить негативное антропогенное воздействие судов и судоходства на окружающую среду путем снижения выбросов и сбросов загрязняющих веществ при переработке и утилизации всех основных видов судовых отходов за счет повторного их использования в технических целях.

Заключение

В результате анализа современной ситуации с судовыми и внесудовыми техническими средствами активной защиты окружающей среды от загрязнений с судов, а также с целью совершенствования системы КОФ в Российской Федерации для решения задач обращения, переработки и утилизации судовых отходов предлагается ряд направлений модернизации применяемых систем комплексной переработки отходов, отличающиеся использованием синергетического эффекта при реализации основных технологических процессов. Реализация данных технических решений сможет обеспечить высокий экономический и экологический эффект при относительно низких капитальных и эксплуатационных расходах.

В современных условиях судовладельцы и инфраструктурные организации речного флота ориентируются на решение задачи повышения доходности грузо- и пассажиро-перевозок при одновременном снижении всех видов издержек. Как уже ранее отмечалось, массовое обновление речного флота новыми экономичными и комфортабельными судами при современной конъюнктуре рынка практически не представляется возможным, таким образом практически единственным доступным путем повышения эффективности судоходства видится обеспечение его инфраструктуры современным экономичным, в том числе экологическим оборудованием, произведенным на территории Российской Федерации с применением преимущественно Российских комплектующих, чему способствуют предлагаемые к реализации мероприятия.

Литература

1. Домнина, О. Л. Влияние санкций на перевозку грузов / О. Л. Домнина // Транспорт. Горизонты развития: Труды 2-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 07–09 июня 2022 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2022. – С. 9.
2. Elkaim, H., Lissane S., Loukili A., A Review and Current Practices on the Valorization of Ship-Generated Oily Waste. IFAC PapersOnLine 58-13 (2024) 817–822, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.583>
3. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г. (МАРПОЛ/MARPOL) (ред. от 17.06.2021)
4. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Парахина А.А. Проблема аварийных сбросов опасных грузов с судов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова - № 3 – ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова», 2011. – С. 149-156.
5. Kotrikla, A.M., Zavantias, A., Kaloupi, M., 2021. Waste generation and management onboard a cruise ship: A case study. Ocean & Coastal Management 212, 105850, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105850>
6. Reusser, C., Osses, J.P., 2021. Modern Ship Engineering, Design and Operations. BoD – Books on Demand.
7. Zhao C., Zhou J., Zheng H. et al. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review, Science of the Total Environment 765 (2021) 142795, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>
8. Moslehiani A., Mobaraki M., Matsuura T., Ismail A.F., Othman M.H.D., Chowdhury M. N. K., Novel green hybrid processes for oily water photooxidation and purification from merchant ship, Desalination 391 (2016) 98–104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.003>
9. Ghidossi R., Veyret D., Scotto J.L., Jalabert T., Moulin P., Ferry oily wastewater treatment, Separation and Purification Technology 64 (2009) 296–303, <https://doi.org/doi:10.1016/j.seppur.2008.10.013>
10. Mancini G., Panzica M., Fino D., Cappello S., Yakimov M.M., Luciano A., Feasibility of treating emulsified oily and salty wastewaters through coagulation and bio-regenerated GAC filtration, Journal of Environmental Management 203 (2017) 817-824, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.014>
11. Gharfalkar, M., Court, R., Campbell, C., Ali, Z., Hillier, G., 2015. Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC. Waste Manag. 39, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007>
12. Argüello, G., 2020. Environmentally sound Management of Ship Wastes: challenges and opportunities for European ports. Journal of Shipping and Trade 5 (1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s41072-020-00068-w>

13. Ramoa, C.E.A., Flores, L.C.S., Stecker, B., 2018. The convergence of environmental sustainability and ocean cruises in two moments: in the academic research and corporate communication. *Rev. Bras. Pesq. Tur. S̃ao Paulo* 12 (2), 152–178. <https://doi.org/10.7784/rbtur.v12i2.1432> maio/ago.
14. Jones, P., Hillier, D., Comfort, D., 2017. The two market leaders in ocean cruising and corporate sustainability. *Int. J. Contemp. Hospit. Manag.* 29 (1), 288–306. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-04-2016-0191>
15. Jones, P., Comfort, D., Hillier, D., 2019. Sustainability and the world's leading ocean cruising companies. *J. Publ. Aff.* 19 (1), e1609. <https://doi.org/10.1002/pa.1609>
16. Sanches, V.L., Aguiar, M.R.D.C.M., de Freitas, M.A.V., Pacheco, E.B.A.V., 2020. Management of cruise ship-generated solid waste: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 151, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110785>
17. Зубрилов С.П., Ищук Ю.Г., Косовский В.И. Охрана окружающей среды при эксплуатации судов / С.П. Зубрилов, Ю.Г. Ищук, В.И. Косовский. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с: ил.
18. Ксенофонтов Б.С., Бойченко В.А. Флотационная очистка сточных вод / Б.С.Ксенофонтов, В.А. Бойченко // Безопасность жизнедеятельности. - 2001. - №2. - С. 20-28.
19. Мизгирев, Д. С. Проектирование метантенка как элемента судовой системы СКПО / Д. С. Мизгирев, А. С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017. – № 52. – С. 107-120.
20. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О.Н. Лебедев, В.А. Сомов, В.Д. Сисин – Л.: Судостроение, 1986. – 108 с.: ил.
21. Концепция совершенствования специальных систем инженерной защиты окружающей среды судов комплексной переработки отходов / Д. С. Мизгирев, В. Н. Захаров, Н. С. Отделкин, А. С. Слюсарев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2020. – № 1(75). – С. 25-35. – DOI 10.17277/voprosy.2020.01.pp.025-035.
22. Мизгирев С.А., Мизгирев Д.С. Паросиловая установка с поршневым двигателем, механизм парораспределения для парового поршневого двигателя (патент на изобретение) / С.А. Мизгирев, Д.С. Мизгирев // № 2359134 С2, МПК F01K21/00. Заявители и патентообладатели: С.А. Мизгирев, Д.С. Мизгирев – заявл. 07.11.2006; опубли. 20.06.2009. - Бюл. № 8. – 8 с.
23. Миллер Э. Применение ультразвука в медицине / Э. Миллер, К. Хилл, Дж. Бэмбер, Р. Дикинсон, П. Фиш, тер Хаарг; под ред. К. Хилла; пер. с англ. под ред. Л.Р. Гаврилова и А.П. Сарвазяна - М.: Мир, 1989.— 568 с.: ил.
24. Resolution MEPC.203(62). Adopted on 15 July 2011. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating theretory (inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI). – 2012. – 16 p.
25. "MP 2.1.6.0157-19. 2.1.6. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений, санитарная охрана воздуха. Формирование программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха и количественная оценка экспозиции для задач социально-гигиенического мониторинга. Методические рекомендации" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 02.12.2019)
26. Абдуллийев И.М., Малахов И.А. Водоподготовка на ТЭС при использовании городских сточных вод / И.М. Абдуллийев, И.А. Малахов и др. – М.: Энергоиздат, 1988. – 632 с; ил.
27. Акулов К.М. Гигиенические критерии оценки доочищенных городских сточных вод, используемых в техническом водоснабжении / К.М. Акулов, М.В. Богданов и др. // Гигиена и санитария. - 1983. - № 5. – С. 25-27.
28. Бланк Ю.И. Обратное водоснабжение на СРЗ / Ю.И. Бланк, В.В. Дябло и др. – М.: Транспорт, 1984. – 207 с.: ил.
29. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения (утв. постановлением от 31 октября 1996 г. № 46). Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.1.7.573-96. - Введ. 31.10.1996. – М.: Минздрав России, 1996. – 38 с.

References

1. Domnina, O. L., Vliyanie sanktsiy na perevozku грузов [The impact of sanctions on cargo transportation], *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 2-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhniy Novgorod*, 07–09 iyunya 2022 goda. – Nizhniy Novgorod: Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, 2022. – p. 9.
2. Elkaime, H., Lissane S., Loukili A., A Review and Current Practices on the Valorization of Ship-Generated Oily Waste. *IFAC PapersOnLine* 58-13 (2024) 817–822, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.583>
3. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (MARPOL) (as amended on 06/17/2021)
4. Naumov V.S., Plastinin A.E., Parakhina A.A. The problem of emergency discharges of dangerous goods from ships. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet No. 3. Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*, 2011. p. 149 156.
5. Kotrikla, A.M., Zavantias, A., Kaloupi, M., 2021. Waste generation and management onboard a cruise ship: A case study. *Ocean & Coastal Management* 212, 105850, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105850>
6. Reusser, C., Osses, J.P., 2021. Modern Ship Engineering, Design and Operations. BoD – Books on Demand.
7. Zhao C., Zhou J., Zheng H. et al. Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review, *Science of the Total Environment* 765 (2021) 142795, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>
8. Moslehyani A., Mobaraki M., Matsuura T., Ismail A.F., Othman M.H.D., Chowdhury M. N. K., Novel green hybrid processes for oily water photooxidation and purification from merchant ship, *Desalination* 391 (2016) 98–104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.01.003>
9. Ghidossi R., Veyret D., Scotto J.L., Jalabert T., Moulin P., Ferry oily wastewater treatment, *Separation and Purification Technology* 64 (2009) 296–303, <https://doi.org/doi:10.1016/j.seppur.2008.10.013>

10. Mancini G., Panzica M., Fino D., Cappello S., Yakimov M.M., Luciano A., Feasibility of treating emulsified oily and salty wastewaters through coagulation and bio-regenerated GAC filtration, *Journal of Environmental Management* 203 (2017) 817-824, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.014>
11. Gharfalkar, M., Court, R., Campbell, C., Ali, Z., Hillier, G., 2015. Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC. *Waste Manag.* 39, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007>
12. Argüello, G., 2020. Environmentally sound Management of Ship Wastes: challenges and opportunities for European ports. *Journal of Shipping and Trade* 5 (1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s41072-020-00068-w>
13. Ramoa, C.E.A., Flores, L.C.S., Stecker, B., 2018. The convergence of environmental sustainability and ocean cruises in two moments: in the academic research and corporate communication. *Rev. Bras. Pesq. Tur. S'ao Paulo* 12 (2), 152–178. <https://doi.org/10.7784/rbtur.v12i2.1432> maio/ago.
14. Jones, P., Hillier, D., Comfort, D., 2017. The two market leaders in ocean cruising and corporate sustainability. *Int. J. Contemp. Hospit. Manag.* 29 (1), 288–306. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-04-2016-0191>
15. Jones, P., Comfort, D., Hillier, D., 2019. Sustainability and the world's leading ocean cruising companies. *J. Publ. Aff.* 19 (1), e1609. <https://doi.org/10.1002/pa.1609>
16. Sanches, V.L., Aguiar, M.R.D.C.M., de Freitas, M.A.V., Pacheco, E.B.A.V., 2020. Management of cruise ship-generated solid waste: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 151, 110785. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110785>
17. Zubrilov S.P., Ishchuk Yu.G., Kosovsky V.I. Environmental protection during ship operation. S.P. Zubrilov, Yu.G. Ishchuk, V.I. Kosovsky. L.: Shipbuilding, 1989. 256 p.: ill.
18. Ksenofontov B.S., Boychenko V.A. Flotation wastewater treatment. B.S.Ksenofontov, V.A. Boychenko. Life safety. 2001. No. 2. pp. 20-28.
19. Mizgirev D. S., Kurnikov A. S. Designing a methane tank as an element of the ship's SPO system . *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport.* 2017. № 52. p. 107-120
20. Lebedev O.N., Somov V.A., Sisin V.D. Water-fuel emulsions in marine diesels. O.N. Lebedev, V.A. So-mov, V.D. Sisin L.: Shipbuilding, 1986. 108 p.: ill.
21. Mizgirev D. S., Zakharov V. N., Otdelkin N. S., Slyusarev A. S. The concept of improving special systems of engineering environmental protection for ships of integrated waste processing. *Issues of modern science and practice.* V.I. Vernadsky University. 2020. № 1(75). Pp. 25-35. – DOI 10.17277/voprosy.2020.01.pp.025-035
22. Mizgirev S.A., Mizgirev D.S. Steam power plant with a piston engine, steam separation mechanism for a steam piston engine (patent for invention). S.A. Mizgirev, D.S. Mizgirev. No. 2359134 C2, MPK F01K21/00. Applicants and patent holders: S.A. Mizgirev, D.S. Mizgirev. application 07.11.2006; publ. 20.06.2009. Byul. No. 8. 8 p.
23. Miller E. The use of ultrasound in medicine. E. Miller, K. Hill, J. Bamber, R. Dickinson, P. Fish, ter Haarg; edited by K. Hill; translated from English. edited by L.R. Gavrilov and A.P. Sarvazyan M.: Mir, 1989. 568 p.: ill.
24. Resolution MEPC.203(62). Adopted on 15 July 2011. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating theretory (inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI). – 2012. – 16 p.
25. "MR 2.1.6.0157-19. 2.1.6. Atmospheric air and indoor air, sanitary air protection. Formation of programs for monitoring the quality of atmospheric air and quantitative assessment of exposure for the tasks of social and hygienic monitoring. Methodological recommendations" (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 02.12.2019)
26. Abdulliev I.M., Malakhov I.A. Water treatment at thermal power plants using urban wastewater / I.M. Abdulliev, I.A. Malakhov et al. M.: Energoizdat, 1988. 632 p.; ill.
27. Akulov K.M. Hygienic criteria for evaluating pretreated urban wastewater used in technical water supply. K.M. Akulov, M.V. Bogdanov et al. Hygiene and sanitation. 1983. No. 5. p. 25 27.
28. Blank Yu.I. Circulating water supply in the SRP. Yu.I. Blank, V.V. Diablo, etc. M.: Transport, 1984. 207 p.: ill.
29. Hygienic requirements for the use of wastewater and its sediments for irrigation and fertilizers (approved by Resolution No. 46 of October 31, 1996). Sanitary rules and regulations: SanPiN 2.1.7.573-96. Introduction. 31.10.1996. Moscow: Ministry of Health of Russia, 1996. 38 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мизгирев Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MizgirevDS@yandex.ru

Dmitriy S. Mizgiryov, Dr. Sci. (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machinery and Machine Repair of the Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Nov-gorod, Nesterova str., 5, e-mail: MizgiryovDS@yandex.ru

Домнина Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Отделкин Николай Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Olga L. Domnina, Ph.D. (Eng), assistant professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Nikolay S. Otdelkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Design Theory of Engineering Cooperation of the Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024.

Научная статья

УДК 629.576

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.055>

Гармонизация продольной устойчивости и остойчивости экраноплана

Савинов В.Н.¹ vladimirsavinov6@gmail.com, Орлов Ю.Ф.¹ yorlov@mts-nn.ru, Крайнов А.А.¹ art.kr-91@ru, Михеева Т.А.² MiheevaTA@yandex.ru¹Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева,²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Статья посвящена построению математической модели начальной продольной остойчивости экраноплана. Показано, что аналогом допущения о равнообъемных наклонениях классической теории корабля является введение в задачу коэффициента связанности перемещений, то есть изменение высоты полёта и угла дифферента - тангажа. Для приближенного учета влияния турбулентной струи от движителей на подъемную силу крыла вблизи опорной поверхности используется предположение о том, что главная часть в выражении для подъемной силы может быть определена из гидравлической задачи о течении в щели, образованной плоским экраном и несущей поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающего движителя. Выполнены расчёты условной метацентрической высоты и плеча остойчивости для экраноплана «Орленок» в зависимости от угла тангажа для различных значений скорости полёта, массы экраноплана, угла отклонения закрылка. Выполнена оценка доли поддувной части подъемной силы в зависимости от скорости, высоты полёта, угла отклонения закрылка.

Ключевые слова: экраноплан, поддув под крыло, продольная остойчивость, низколетящее крыло, условная метацентрическая высота, плечо остойчивости.

Для цитирования: Савинов В.Н., Орлов Ю.Ф., Крайнов А.А., Михеева Т.А. Гармонизация продольной устойчивости и остойчивости экраноплана. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 24—30. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.055

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.055>

Harmonization of longitudinal stability and ship stability of ekranoplan

Vladimir N. Savinov¹ vladimirsavinov6@gmail.com, Yuri F. Orlov¹ yorlov@mts-nn.ru,Artem A. Krainov¹ art.kr-91@mail.ru, Tatiana A. Mikheeva² MiheevaTA@yandex.ru¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation,²Volga State University of Water Transport

Abstract. The article is devoted to the development of a mathematical model of the initial longitudinal stability of an ekranoplan. It is shown that an analogue of the assumption of equal-volume inclinations of the classical ship theory is the introduction of the coefficient of motion connectivity into the problem, that is, a change in flight altitude and the angle of trim - pitch. To approximate the effect of the turbulent jet from the propellers on the lifting force of the wing near the support surface, the assumption is used that the main part in the expression for the lifting force can be determined from the hydraulic problem of flow in a gap formed by a flat screen and a bearing surface blown by a turbulent jet from a running propulsor. Calculations of the conditional metacentric height and stability shoulder for the Orlyonok ekranoplan were performed depending on the pitch angle for various values of flight speed, the mass of the ekranoplan, and the angle of deflection of the flap. The proportion of the blown part of the lifting force is estimated depending on the speed, altitude, angle of flight

Key words: ekranoplan, underwing, longitudinal stability, low-flying wing, conventional metacentric height, stability arm.

For citation: Vladimir N. Savinov, Yuri F. Orlov, Artem A. Krainov, Tatiana A. Mikheeva Harmonization of longitudinal stability and ship stability of ekranoplan, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 24—30. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.055

Введение

Экранопланом называют транспортное средство для перемещения над поверхностью, поддерживаемое в атмосфере за счёт взаимодействия с воздухом, отражённым от поверхности земли или воды. Аэродинамический экран образуется при движении крыла на относительно небольшой (до нескольких метров) высоте от опорной поверхности.

International Maritime Organization (IMO) – международная межправительственная

организация, специализированное учреждение ООН, служащее площадкой для сотрудничества и обмена информацией по техническим вопросам, связанным с международным судоходством, относит экранопланы к морским судам [8, 9, 10] с динамическим поддержанием (СДПП). *Продольная остойчивость* таких судов определяется методами теории корабля и характеризуется продольной метацентрической высотой. Конструкция и материалы экранопланы схожи с самолетами. Низко летящий над экраном самолет характеризуется *устойчивостью продольного движения*, определяемой нормами летной годности. Это

предполагает, на наш взгляд, возможность гармонизации корабельной *остойчивости* и летной *устойчивости* в крейсерском режиме движения экраноплана.

Уравнения равновесия в продольной плоскости

Запишем уравнения движения в скоростной системе координат [1]

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= X - G \sin \theta; \\ mV\dot{\theta} &= Y - G \cos \theta; \\ J_z\ddot{\theta} &= M_z; \\ \dot{h} &= V \sin \theta; \theta = \theta + \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где m – водоизмещение (масса) экраноплана; V – скорость хода (полета); θ – угол наклона траектории полета; ϑ – угол дифферента (тангажа); α – угол атаки; h – высота полета; $G = mg$ – вес аппарата; g – ускорение свободного падения; X , Y и M_z – проекции сил на оси Ox , Oy и момент сил относительно оси Oz ; J_z – момент инерции массы аппарата относительно оси Oz ; $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t}$; t – время.

При горизонтальном равномерном движении $X = 0$; $Y = G$; $M_z = 0$; $\theta = 0$.

Рассматривая возмущения горизонтального полета [1 – 3] получим при $\Delta V = 0$ систему уравнений возмущенного продольного движения

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{h} &= \Delta \ddot{Y}; \\ \Delta \ddot{\theta} &= \Delta \ddot{M}_z; \\ \Delta \dot{h} &= Fr \Delta \theta; \\ \Delta \alpha &= \Delta \vartheta - \Delta \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta \ddot{h} = \Delta h/L$ – безразмерное приращение высоты полета; $\Delta \ddot{Y}$, $\Delta \ddot{M}_z$ – безразмерные приращения силы и момента; $Fr = V/\sqrt{gL}$ – число Фруда по характерной длине L ; $\left(\frac{\partial}{\partial \tau}\right) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial \tau}$; $\left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2}\right) = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \tau^2}$; $\tau = \frac{t}{\sqrt{L/g}}$ – безразмерное время.

Приращения сил и момента можно определить так

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{Y} &= \ddot{Y}^F \Delta Fr + \ddot{Y}^\alpha \Delta \alpha + \ddot{Y}^\vartheta \Delta \vartheta + \ddot{Y}^h \Delta \ddot{h} + \\ &+ \ddot{Y}^F \Delta \dot{F}r + \ddot{Y}^\alpha \Delta \dot{\alpha} + \ddot{Y}^\vartheta \Delta \dot{\vartheta} + \ddot{Y}^h \Delta \dot{h} + \dots; \\ \Delta \ddot{M}_z &= \ddot{M}_z^F \Delta Fr + \ddot{M}_z^\alpha \Delta \alpha + \ddot{M}_z^\vartheta \Delta \vartheta + \ddot{M}_z^h \Delta \ddot{h} + \\ &+ \ddot{M}_z^F \Delta \dot{F}r + \ddot{M}_z^\alpha \Delta \dot{\alpha} + \ddot{M}_z^\vartheta \Delta \dot{\vartheta} + \ddot{M}_z^h \Delta \dot{h} + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где верхний индекс – символ соответствующей частной производной. Несущие элементы экраноплана для разных углов дифферента ϑ будут на разной высоте относительно экрана. Относительное отстояние центра масс аппарата от экрана $\bar{h}$ используется для определения отстояния конкретного несущего элемента h_k по формуле

$$h_k = h + r_k \sin \vartheta \approx h + r_k \vartheta, \quad (4)$$

где r_k – расстояние от центра масс до точки приложения силы на несущем элементе (или точки, относительно которой определена зависимость момента элемента). Поэтому в выражениях (3) производные по углу тангажа дифферента (и по его производным) имеют для каждого элемента такой смысл

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} = r_k \frac{\partial}{\partial h_k}; \frac{\partial}{\partial \vartheta} = r_k \frac{\partial}{\partial h_k}; \dots$$

Характеристическое уравнение системы дифференциальных уравнений (2) имеет вид [3]

$$P^4 + A_3 P^3 + A_2 P^2 + A_1 P + A_0 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= \ddot{Y}^h (\ddot{m}_z^\alpha + \ddot{m}_z^\vartheta) - \ddot{m}_z^h (\ddot{Y}^\alpha + \ddot{Y}^\vartheta); \\ A_1 &= -\frac{1}{F} \ddot{Y}^\alpha \ddot{m}_z^\vartheta + \frac{1}{F} \ddot{Y}^\vartheta \ddot{m}_z^\alpha + \ddot{Y}^h (\ddot{m}_z^\vartheta + \ddot{m}_z^\alpha); \\ A_2 &= -\ddot{Y}^h - \frac{1}{F} \ddot{m}_z^\vartheta \ddot{Y}^\alpha - \ddot{m}_z^\alpha - \ddot{m}_z^\vartheta; \\ A_3 &= \frac{1}{F} \ddot{Y}^\alpha - \ddot{m}_z^\vartheta - \ddot{m}_z^\alpha. \end{aligned}$$

Для экранопланов почти всегда выполняются неравенства

$$A_1 > 0, A_2 > 0, A_3 > 0. \quad (6)$$

Поэтому единственным условием асимптотической устойчивости решений системы уравнений (2) будет неравенство

$$A_0 > 0. \quad (7)$$

Устойчивость колебаний решений определяется условием

$$A_3 A_2 A_1 - A_3^2 A_0 - A_1^3 > 0. \quad (8)$$

Преобразуем выражение для A_0 . В стационарном в горизонтальном полете угол наклона траектории $\Theta = 0$, в связи с чем $\alpha = \vartheta$ и в выражении для A_0 можно положить $\frac{\partial}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \vartheta}$.

Тогда

$$\begin{aligned} A_0 &= \ddot{Y}^h 2 \ddot{m}_z^\vartheta - \ddot{m}_z^h 2 \ddot{Y}^\vartheta = 2 \ddot{Y}^h \ddot{Y}^\vartheta \left(\frac{\ddot{m}_z^\vartheta}{\ddot{Y}^\vartheta} - \frac{\ddot{m}_z^h}{\ddot{Y}^h} \right) = \\ &= -2 \ddot{Y}^h \ddot{Y}^\vartheta (f^{(h)} - f^{(\vartheta)}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $f^{(h)} = \left(\frac{\partial \ddot{m}_z}{\partial h} \right) / \left(\frac{\partial \ddot{Y}}{\partial h} \right)$ – фокус аппарата по отстоянию; $f^{(\vartheta)} = \left(\frac{\partial \ddot{m}_z}{\partial \vartheta} \right) / \left(\frac{\partial \ddot{Y}}{\partial \vartheta} \right)$ – фокус аппарата по углу дифферента.

Поскольку обычно $\frac{\partial \ddot{Y}}{\partial h} < 0$ и $\frac{\partial \ddot{Y}}{\partial \alpha} > 0$, то условие (7) с учетом (9) трактуется так: экраноплан устойчив, если фокус по отстоянию находится впереди фокуса по дифференту. Рассмотрим теперь устойчивость продольного движения полета экраноплана с позиций теории корабля [4]. Метacentрическая формула остойчивости имеет вид

$$M_{z\vartheta} = GN\psi, \quad (10)$$

где $M_{z\vartheta}$ – восстанавливающий момент при дифференте аппарата на угол ψ , причем $\psi = -\vartheta$, так как традиционно в теории корабля положительным считается дифферент на нос; N – продольная условная метacentрическая высота. В соответствии с (10) условную метacentрическую высоту можно

определить как величину, пропорциональную отношению приращения восстанавливающего момента ΔM_{zv} к приращению угла дифферента $\Delta\psi$

$$H = \Delta M_{zv} / (G \Delta\psi), \quad (11)$$

Выполнение соотношений (10) и (11) предполагает выполнение условий равновесия

$$\Delta X = 0; \Delta Y = 0; \Delta M_{zv} = \Delta M_{zd}, \quad (12)$$

где ΔX , ΔY – приращения горизонтальных и вертикальных сил; ΔM_{zd} – дифференцирующий момент.

Аналогично (3), можно представить приращение ΔY и ΔM_{zv} усеченными разложениями в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} \Delta Y &\approx Y^\alpha \Delta\alpha + Y^h \Delta h + Y^\psi \Delta\psi; \\ \Delta M_{zv} &\approx m_z^\alpha \Delta\alpha + m_z^h \Delta h + m_z^\psi \Delta\psi \end{aligned} \quad (13)$$

При $\Delta\alpha = \Delta\vartheta = -\Delta\psi$, с учетом этого и (13) из (11) получим

$$H = -\frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \alpha} + \frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \psi} + \frac{\partial \bar{m}_z}{\partial h} \frac{\Delta h}{\Delta\psi}, \quad (14)$$

где

$$\bar{m}_z = m_z / G.$$

В (14) величина $\Delta h / \Delta\psi$ является коэффициентом связанности двух типов движения: движения по вертикали и поворота относительно поперечной оси. Этот параметр является характерной особенностью экранопланов (также как и судов с динамическими принципами поддержания) по сравнению с классическими самолетами и водоизмещающими судами. Аналогом этой величины у водоизмещающих судов является изменение посадки при так называемых равнообъемных наклонениях [4]. Это принципиальное отличие начальной продольной устойчивости экраноплана от водоизмещающих судов.

Для определения коэффициента связанности $\Delta h / \Delta\psi$ используем второе уравнение в (12) и разложение (13)

$$\Delta \bar{Y} = -\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \psi} \Delta\psi = 0.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta h}{\Delta\psi} = -\frac{\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \psi}}{\frac{\partial \bar{Y}}{\partial h}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получим

$$H = -(\bar{m}_z^\alpha - \bar{m}_z^\psi) + \frac{\bar{m}_z^h}{\bar{Y}^h} (\bar{Y}^\alpha - \bar{Y}^\psi), \quad (14')$$

или учитывая, что $\theta = 0$ и $\Delta\alpha = -\Delta\psi = \Delta\vartheta$, найдем

$$H = 2\bar{Y}^\vartheta \left(\frac{\bar{m}_z^h}{\bar{Y}^h} - \frac{\bar{m}_z^\vartheta}{\bar{Y}^\vartheta} \right) = 2\bar{Y}^\vartheta (f^h - f^\vartheta) = -\frac{A_0}{\bar{Y}^h}. \quad (14'')$$

Выражения (14') или (14'') являются расчетными для определения начальной продольной условной метацентрической высоты экранопланов. Из (14''), в частности, следует, что условие достаточной продольной остойчивости экраноплана $H > 0$ эквивалентно условию асимптотической устойчивости продольного движения (7) $A_0 > 0$.

Практические формулы для расчетов условной метацентрической высоты зависят от формы представления информации о силах и моментах на элементах гидроаэродинамического комплекса. Если эти величины представить как суммы по элементам комплекса, то на основании (4), (13), (14) и (15) можно получить [3, 5]

$$\begin{aligned} H &= \sum_{k=1}^N A_k \left\{ y_k C_{y_k} - x_k C_{y_k}^\alpha - b_k C_{mk}^\alpha + (x_k C_{y_k}^h + \right. \\ &\quad \left. b_k C_{mk}^h) \frac{\Delta h}{\Delta\psi} \right\}; \\ \frac{\Delta h}{\Delta\psi} &= -\frac{\sum_{k=1}^N (C_{y_k}^\alpha + x_k C_{y_k}^h)}{\sum_{k=1}^N A_k C_{y_k}^h}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $A_k = \frac{1}{2} \rho_k V^2 S_k / G$, S_k – характерная площадь k -го элемента; b_k – характерный линейный размер k -го элемента в формуле для момента; (x_k, y_k) – координаты точки на несущем элементе, определяющей его положение в пространстве при движении аппарата со скоростью V ; C_{y_k} , C_{mk} – коэффициенты подъемной силы и момента несущего элемента.

По данным о продувке аппарата в аэродинамической трубе формулы (16) упрощаются

$$\frac{\Delta h}{\Delta\psi} = -\frac{C_y^\alpha + x_{ц.д.} C_y^h}{C_y^h}, \quad (17)$$

$$H = \frac{Q}{G} b_{сак} \left[-C_m^\alpha + C_m^h \left(-x_{ц.д.} + \frac{\Delta h}{\Delta\psi} \right) \right],$$

где $x_{ц.д.}$ – координата точки приложения силы на основном крыле; $b_{сак}$ – средняя аэродинамическая хорда; $Q = \frac{1}{2} \rho V^2 S$.

В формулах (16) и (17) не учтены составляющие от сил сопротивления и тяги движителей, которые, как правило, имеют второй порядок малости.

Дополнительные составляющие в (16) или (17) от поддувной части подъемной силы и момента определяются по методу, изложенному в [6] и [7].

В [6] предложена схема приближенного учета влияния турбулентной струи от движителей на подъемную силу крыла вблизи опорной поверхности. Как показали расчеты, выполненные для СДВП «Волга-2», и сопоставление их с натурным экспериментом, представленное в [7], главная часть в выражении для подъемной силы может быть определена из гидравлической задачи о поле скоростей и давлений в щели, образованной плоским экраном и несущей поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающего движителя [6].

Влияние поддува на характеристики устойчивости продольного движения проявляется через сильную зависимость дополнительной поддувной подъемной силы $Y_{вп}$ от положения крыла с шайбами относительно экрана. На геометрию щели между крылом с шайбами и экраном, очевидно, влияют отстояние аппарата от экрана h и угол

дифферента ϑ . От этих величин зависит как величина $S_{вх}$, так и величина $S_{вых}$ площадей щелей по периметру между экраном и крылом. Выражение для поддувной подъёмной силы имеет вид [6]

$$Y_{вп} = q_{вп} D_S, \quad (18)$$

где

$$q_{вп} = \frac{1}{2} \rho V_{вх}^2 S_{кр}$$

$$D_S = \left(1 - \frac{S_{вх}^2}{S_{вых}^2}\right) > 0. \quad (19)$$

Тогда производные $Y_{вп}$ по h и ϑ будут иметь вид

$$\begin{aligned} Y_{вп}^{h,\vartheta} &= q_{вп} D_S^{h,\vartheta}, \\ D_S^{h,\vartheta} &= 2 \frac{S_{вх}^2}{S_{вых}^2} \left(\frac{S_{вх}^{h,\vartheta}}{S_{вых}} - \frac{S_{вх}}{S_{вых}^2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Для вычисления производных в (20) необходимы зависимости геометрии входных и выходных площадей от отстояния h и угла дифферента ϑ , которые могут быть определены по чертежам аппарата.

Дополнительный момент от поддувной силы $M_{звп}$ можно определить, если известно положение центра давления $x_{вп}$.

Тогда

$$M_{звп} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) Y_{вп}. \quad (21)$$

Так как положение центра давления слабо меняется в зависимости от h и ϑ [7], то производные дополнительного продольного момента можно приближенно определить так:

$$M_{звп}^{h,\vartheta} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) Y_{вп}^{h,\vartheta}$$

или

$$m_{звп}^{h,\vartheta} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) \bar{Y}_{вп}^{h,\vartheta}, \quad (22)$$

где

$$\bar{m}_{звп} = M_{звп}/G; \quad \bar{Y}_{вп} = Y_{вп}/G.$$

Формулы (15) и (14) для коэффициента связанности перемещений и условной метацентрической высоты являются расчетными для определения характеристик продольной остойчивости движения экранопланов с учетом поддува движителей под крыло (23).

$$\frac{\Delta h}{\Delta \psi} = - \frac{\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{вп}^\vartheta}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{вп}^h},$$

$$H = - \left(\bar{m}_z^\alpha + \bar{m}_z^\vartheta + m_{звп}^\vartheta \right) \frac{\bar{m}_z^h + \bar{m}_{звп}^h}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{вп}^h} (\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{вп}^\vartheta). \quad (23)$$

Иллюстрация расчетов для экраноплана «Орленок»

Рассмотрим схему расчета начальной остойчивости экраноплана «Орленок»:

1) Независимые переменные расчета: весовое водоизмещение $G = 100, 122, 140$ т, угол отклонения закрылка $\delta z = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, угол дифферента $\vartheta = -1^\circ, \dots, +3^\circ$, скорость полета $V = 250, \dots, 350$ км/час.

2) Для каждого набора данных определяется положение экраноплана по высоте.

При этом дополнительная подъемная сила и момент от поддува определяются по схеме, изложенной в [6] по формулам (18), (19).

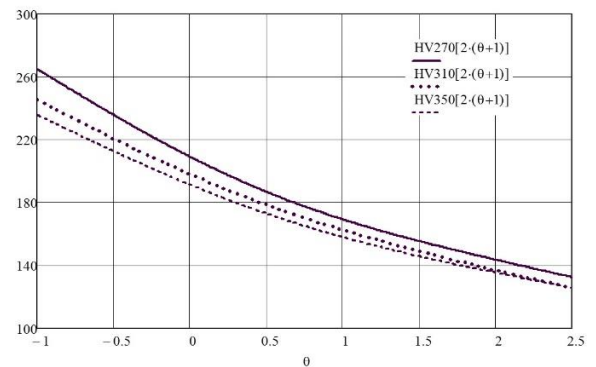
3) По формулам (22), (23) рассчитываются условная метацентрическая высота H и коэффициент связанности перемещений $\Delta h/\Delta \psi$.

4) Определяется плечо продольной остойчивости

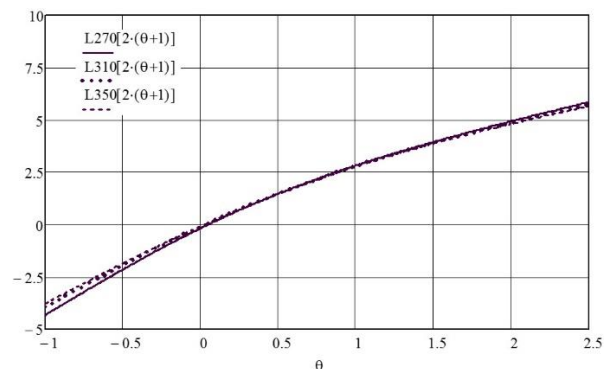
$$l_{пр} = H \cdot \vartheta. \quad (24)$$

Результаты расчета

На рис. 1 приведен пример зависимости от угла дифферента для трех различных скоростей в пределах от взлетной скорости до крейсерской ($V = 270, 310, 350$ км/час). Постоянные параметры - масса экраноплана и угол отклонения закрылков.



а)



б)

Рис. 1. а) – зависимость условной метацентрической высоты H от угла дифферента, водоизмещение 122 т., отклонение закрылка $\delta z = 0^\circ$, скорость $V = 270, 310, 350$ км/час;

б) - зависимость плеча начальной остойчивости l от угла дифферента при тех же параметрах

На рис.2 приведена зависимость условной метацентрической высоты H от веса экраноплана.

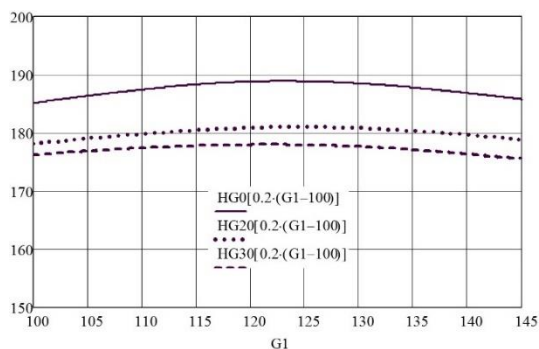
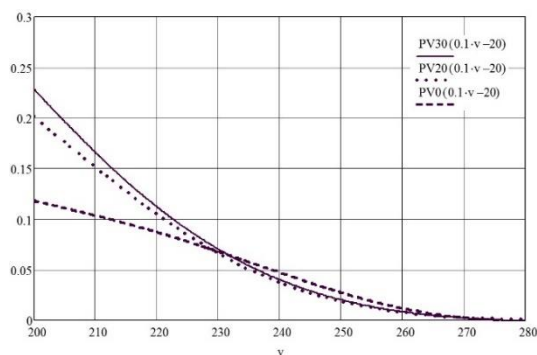
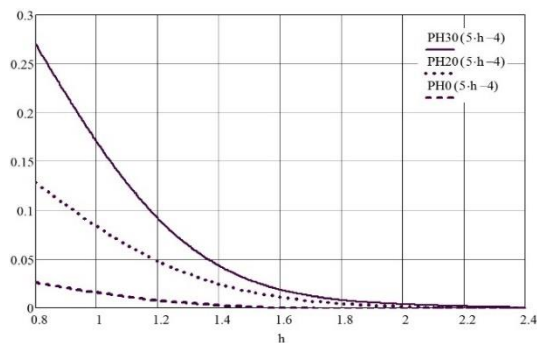


Рис.2. Зависимость условной метацентрической высоты H от водоизмещения G для трёх значений угла отклонения закрылка $\delta=0, 20, 300$, $G = 125$ т, $\vartheta = 0^\circ$

Зависимость относительной доли поддувной подъемной силы $Y_{вп}$ от скорости движения и от высоты полета приведена на рис. 3.,



а)



б)

Рис.3. а) – поддувная подъемная сила в долях суммарной подъемной силы $Y_{вп}$ в зависимости от скорости v км/ч для трёх значений угла отклонения закрылка $\delta=30, 20, 00$, $G=125$ т, $\vartheta=0^\circ$;
б) – то же в зависимости от высоты полёта h

Заключение

Анализ результатов расчета позволяет отметить следующее:

- условная метацентрическая высота имеет наибольшие значения на взлете и с ростом скорости уменьшается, стремясь к своему пределу, слабо зависящему от скорости, для аппарата в полете вдали от экрана;
- с ростом угла дифферента условная метацентрическая высота уменьшается;
- зависимость величины плеча продольной остойчивости от угла дифферента существенно нелинейна и несимметрична относительно $\vartheta = 0$: при отрицательных углах тангажа величина l_n по абсолютной величине больше, чем l_n при тех же положительных значениях ϑ ;
- величина условной продольной метацентрической высоты слабо зависит от водоизмещения экраноплана и уменьшается с ростом угла отклонения закрылка, что связано с увеличением при этом высоты полета;
- поддувная подъемная сила на предвзлетных режимах сильно зависит от угла отклонения закрылка, составляя существенную величину и быстро уменьшается при увеличении высоты полета вплоть до полного исчезновения.

Нормирование продольной остойчивости (устойчивости продольного движения) экранопланов по восстанавливающему моменту (по условной метацентрической высоте) имеет ясное физическое содержание и более чем трёхсотлетнюю историю. Следует ожидать возможность гармонизации некоторых положений правил классификации и постройки морских судов и норм лётной годности.

Литература

1. Остославский И.В., Калачев Г.С. Продольная устойчивость и управляемость самолета / И.В. Остославский, Г.С. Калачев. – М.: Оборонгиз, 1951. – 363 с.
2. Иродов Ф.Д. Ученые записки ЦАГИ, Т. 1, 1970. – с. 68 – 72.
3. Орлов Ю.Ф. К вопросу о статической устойчивости тел, движущихся вблизи жидкой или твердой поверхности. – В кн.: Асимптотические методы в механике / Ю.Ф. Орлов. – Иркутск, СЭИ СО АН СССР, 1979. – с. 88 – 106.
4. Алферьев М.Я. Теория корабля. – М.: Транспорт, 1972. – 448 с.
5. Орлов Ю.Ф. Потенциал ускорений в гидродинамике корабельных волн / Ю.Ф. Орлов. – Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1979. – 214 с.

6. Орлов Ю.Ф. Приближенный расчет подъемной силы крыла вблизи опорной поверхности в струе от движителей. – В кн.: Асимптотические методы в теории систем / Ю.Ф. Орлов. – Иркутск, ИНЦ СО АН СССР, 1990. – с. 14 – 32.
7. Антонов А.А., Орлов Ю.Ф., Соколов В.В. Особенности продольной остойчивости судна на динамической воздушной подушке «Волга-2». – В кн.: Асимптотические методы в теории систем. – Иркутск, ИНЦ СО АН СССР, 1990. – с. 200 – 218
8. Сергеев В.Г., Варакосов Ю.Г., К вопросу внедрения гражданских экранопланов в транспортную систему России // Проектирование, строительство и эксплуатация аэродромов: Сборник научных трудов. М: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр". 2023. С. 120-130.
9. Fevral'skikh A.V, Kupchik V. Numerical Simulation of 3D Surfaces Icing Near the Moving Wall // Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2021. P. 269–281.
10. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Несущая система экраноплана схемы "танDEM" и ее аэродинамические характеристики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 2(133). С. 193-208.
11. Экранопланы - транспортные суда XXI века / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян и др. - Санкт-Петербург: Судостроение, 2005. - 576 с.
12. Хрунков С.Н., Лысенко Е.Л., Сеземин А.В., Ахмадбекова И.Х. Особенности работы газотурбинных двигателей на экранопланах // Транспортные системы. 2019. № 1 (11). С. 49-54.
13. Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В. Оценка применимости методов расчета коэффициента индуктивного сопротивления простого крыла с шайбами при полете у поверхности Земли. // Научные проблемы водного транспорта. 2020. Выпуск 3 (64). – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», С.
14. Февральских А.В., Машкевич И.К., Лучков А.Н., Грамузов Е.М. Определение аэродинамических характеристик крыла экраноплана с использованием технологий машинного обучения. // Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 2023. № 2 часть 1 Сквозной номер 60. С. 295 – 303.

References

1. Ostoslavskiy I.V., Kalachev G.S. Prodol'naya ustoychivost' i upravlyaemost' samoleta [Longitudinal stability and controllability of the airplane]. M.: Oborongis, 1951. 363 s.
2. Irodon F.D. Uchenye zapiski TsAGI [TsAGI Scientific Notes], T. 1, 1970. s. 68-72.
3. Orlov Yu.F. K voprosu o staticheskoy ustoychivosti tel, dvizhushchikhsya vblizi zhidkoy ili tverдой poverkhnosti. – V kn.: Asimptoticheskie metody v mekhanike [On the issue of static stability of bodies moving near a liquid or solid surface]. Irkutsk, SEI SO AN SSSR, 1979. s. 88-106.
4. Alfer'ev M.Ya. Teoriya korablya [Ship theory]. M.: Transport, 1972. 448 s.
5. Orlov Yu.F. Potentsial uskoreniy v gidrodinamike korabel'nykh voln [Acceleration potential in the hydrodynamics of ship waves]. Novosibirsk: Nauka, Sib. Otdelenie, 1979. 214 s.
6. Orlov Yu.F. Priblizhennyy raschet pod'emnoy sily kryla vblizi opornoй poverkhnosti v strue ot dvizhiteley. V kn.: Asimptoticheskie metody v teorii system [Approximate calculation of the lifting force of a wing near the supporting surface in the jet from the propulsors]. Irkutsk, INTs SO AN SSSR, 1990. s. 14-32.
7. Antonov A.A., Orlov Yu.F., Sokolov V.V. Osobennosti prodol'noy ostoychivosti sudna na dinamicheskoy vozduшной podushke «Volga-2» [Features of longitudinal stability of the dynamic air cushion vessel "Volga-2"]. V kn.: Asimptoticheskie metody v teorii sistem. Irkutsk, INTs SO AN SSSR, 1990. s. 200-218.
8. Sergeev V.G., Varakosov Yu.G., On the issue of introducing civilian ekranoplanes into the Russian transport system. Design, construction and operation of airfields: A collection of scientific papers. M: Limited Liability Company "Techpoligrafcenter". 2023. pp. 120-130.
9. Fevral'skikh A.V, Kupchik V. Numerical Simulation of 3D Surfaces Icing Near the Moving Wall. Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2021. P. 269–281.
10. Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. Nesushchaya sistema ekranoplana skhemy "tandem" i ee aerodinamicheskie kharakteristiki [Tandem ekranoplan support system and its aerodynamic characteristics]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. T. 22, № 2(133). S. 193-208.
11. Ekranoplans - transport vessels of the 21st century. A.I. Maskalik, R.A. Nagapetyan and others. Sankt-Peterburg: Sudostroenie, 2005. 576 p.
12. Khrunkov S.N., Lysenko E.L., Sezemin A.V., Akhmadbekova I.Kh. Peculiarities of operation of gas turbine engines on ekranoplanes. Transport systems. 2019. № 1 (11). P. 49-54.
13. Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В. Оценка применимости методов расчета коэффициента индуктивного сопротивления простого крыла с шайбами при полете у поверхности Земли. // Научные проблемы водного транспорта. 2020. Выпуск 3 (64). – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», С.
14. Февральских А.В., Машкевич И.К., Лучков А.Н., Грамузов Е.М. Определение аэродинамических характеристик крыла экраноплана с использованием технологий машинного обучения. // Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 2023. № 2 часть 1 Сквозной номер 60. С. 295 – 303.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Савинов Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры аэрогидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, 24, e-mail: vladimirsavinov6@gmail.com

Vladimir N. Savinov, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Department of Aerohydrodynamics, Machine Strength and Material Strength, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603155, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: vladimirsavinov6@gmail.com

Орлов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Прикладная математика, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: yorlov@mts-nn.ru

Yuri F. Orlov, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department Applied Mathematics, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: yorlov@mts-nn.ru

Крайнов Артем Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, 24, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Artem A. Krainov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603155, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Михеева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Ship Design and Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2024.
Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2024.
Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2024.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА THEORY OF SHIP AND STRUCTURAL MECHANICS

Научная статья

УДК 629.576

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.056>

Упрощенная методика учёта влияния затопленной газовой струи от движителей экраноплана на аэродинамические характеристики крыла с законцовками в режиме полета у опорной поверхности

Ваганов А.Б.¹ al.vaganov2013@yandex.ru, Орлов Ю.Ф.¹ yorlov@mts-nn.ru, Крайнов А.А.¹ art.kr-91@mail.ru,
Михеева Т.А.² MiheevaTA@yandex.ru

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В работе рассмотрены две методики, позволяющие учитывать влияние затопленной газовой струи от движителей экраноплана на аэродинамические характеристики низколетящего крыла с законцовками. Первая методика базируется на решении краевой задачи о работе крыла при полете вблизи опорной поверхности в присутствии диска диполей, моделирующего работу движителей. Во второй методике решена гидравлическая задача о поле скоростей и давлений газа в пространстве, ограниченном плоским экраном и опорной поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающих движителей экраноплана. В расчетах использованы исходные данные, включающие геометрические параметры комплекса крыло - движитель и характеристики движителя экраноплана. Определены производные коэффициентов поддувной подъемной силы и момента, предложены поправки для нахождения условной метацентрической высоты, учитывающие влияние поддува под крыло на продольную остойчивость экраноплана. Сравнение расчетных результатов, полученных по второй, по упрощенной методике, с результатами натурных экспериментов, выполненных в Центральном конструкторском бюро по судам на подводных крыльях им. Р. Е. Алексеева для пассажирского экраноплана «Волга-2» подтвердило его точность, достаточную для практических инженерных расчетов.

Ключевые слова: экраноплан, поддув под крыло, продольная остойчивость, низколетящее крыло, условная метацентрическая высота, плечо остойчивости.

Для цитирования: Ваганов А.Б., Орлов Ю.Ф., Крайнов А.А., Михеева Т.А. Упрощенная методика учёта влияния затопленной газовой струи от движителей экраноплана на аэродинамические характеристики крыла с законцовками в режиме полета у опорной поверхности. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 31—37. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.056

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.056>

A simplified method for accounting for the effect of a flooded gas jet from ekranoplane engines on the aerodynamic characteristics of a wing with wingtips in flight mode at the support surface

Alexander B. Vaganov¹ al.vaganov2013@yandex.ru, Yuri F. Orlov¹ yorlov@mts-nn.ru,
Artem A. Krainov¹ art.kr-91@mail.ru, Tatiana A. Mikheeva² MiheevaTA@yandex.ru

¹R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation,

²Volga State University of Water Transport

Abstract. The paper considers two methods that allow taking into account the influence of a flooded gas jet from the propellers of an ekranoplane on the aerodynamic characteristics of a low-flying wing with tips. The first technique is based on solving the boundary value problem of the wing operation when flying near the support surface in the presence of a dipole disk simulating the operation of propellers. The second method solves the hydraulic problem of the velocity and pressure field of gas in a space bounded by a flat screen and a support surface blown by a turbulent jet from the working propellers of the ekranoplane. The calculations used the initial data, including the geometric parameters of the wing-propulsor complex and the characteristics of the propulsor of the ekranoplane. The derivatives of the coefficients of the blown lift and torque are determined, corrections are proposed to find the conditional metacentric height, taking into account the effect of blowing under the wing on the longitudinal stability of the ekranoplane. Comparison of the calculated results obtained by the second, simplified method, with the results of field experiments performed at the Central Design Bureau for Hydrofoils named after R. E. Alekseeva for the Volga – 2 passenger ekranoplane confirmed its accuracy, sufficient for practical engineering calculations.

Key words: ekranoplane, low-flying wing, dipole disk, blowing under the wing, turbulent jet, longitudinal stability.

For citation: Alexander B. Vaganov, Yuri F. Orlov, Artem A. Krainov, Tatiana A. Mikheeva A simplified method for accounting for the effect of a flooded gas jet from ekranoplane engines on the aerodynamic characteristics of a wing

with wingtips in flight mode at the support surface, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 31—37.
DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.056

Введение

На протяжении последнего столетия кораблестроители, борясь за скорость, стремятся уменьшить сопротивление среды движению судна. Одним из самых эффективных методов является попытка «вытащить судно из воды», поднять его в воздух — среду в 840 раз менее плотную, чем вода. Глиссирование, подводные крылья, воздушная подушка, — таковы ступени развития этой идеи, последнюю из которых занимают экранопланы, то есть аппараты, использующие при движении эффект повышения давления воздуха под крылом вблизи водной поверхности — экрана. Экранирующей поверхностью может быть и земля, поэтому экранопланы, как и суда на воздушной подушке, являются амфибиями: они способны выходить на сушу, преодолевать заболоченные участки, парить над замерзшими водоемами и так далее.

При этом одной из самых сложных задач является задача обеспечения старта экраноплана с водной поверхности, которая может быть решена разными методами, требующими разных подходов к их моделированию.

Постановка задачи

Компоновки экранопланов, разработанных в центральном конструкторском бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева, в большинстве своем предусматривают специализированные стартовые устройства (СУ), обеспечивающие увеличение подъемной силы на режиме старта за счет поддува воздуха работающими двигателями под крыло экраноплана [8].

Поэтому решение задачи о движении крыла конечного размаха с постоянной скоростью v_0 вблизи опорной поверхности, представляет интерес в постановке, при которой крыло имеет впереди себя движитель, в выходном сечении которого диаметром D (в диске движителя) генерируется турбулентная затопленная струя, обеспечивающая поддув воздуха в щель между крылом и экраном и, соответственно, дополнительную силу тяги (см. Рис. 1 а, б).

В такой постановке задача была сформулирована в работе [1], где представлены две принципиально разные расчётные схемы учёта влияния поддува воздуха под крыло экраноплана на динамику его продольного движения и на аэродинамические характеристики его крыла.

Так как в данной постановке изучается задача в линейной постановке, то применяя метод суперпозиции её корректно можно разделить на две следующие задачи.

1. Движение несущей поверхности в потенциальном потоке над плоским экраном за диском диполей D , моделирующим движитель.
2. Гидравлическая задача о поле скоростей и давлений в пространстве, ограниченном плоским экраном и опорной поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающих движителей экраноплана.

Подходы к решению второй задачи ранее были использованы для многофакторного анализа

продольной остойчивости пассажирского экраноплана «Волга-2» в работе [2].

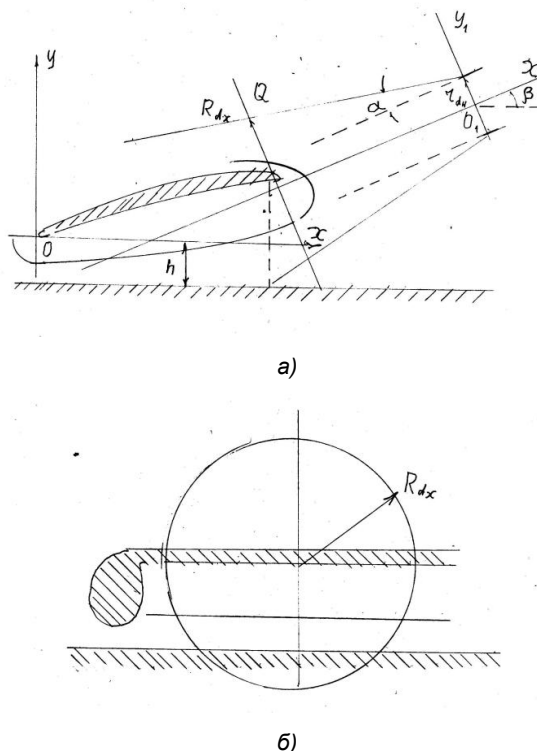


Рис. 1. Геометрия аэродинамического комплекса крыло – движитель

Решение краевой о работе крыла при полете вблизи опорной поверхности в присутствии диска диполей

Эта задача формулируется как краевая для уравнения Лапласа от функции потенциала ускорений с краевыми условиями:

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= 0, \quad q \in \Omega; \\ \frac{\partial}{\partial t} \theta &= F(q), \quad q \in S_p; \quad \frac{\partial}{\partial z} \theta = 0, \quad z = -h; \\ [\theta] &= 0, \quad x = 0, \quad z = 0; \quad [\theta] = \frac{P_d}{\rho}, \quad q \in D; \\ \nabla \theta &\rightarrow 0, \quad x \rightarrow +\infty. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь θ – потенциал ускорений, $q = (x, y, z)$, Ω – пространство, занятое жидкостью (см. рис. 1), $F(q) = N_0^{-1}(F_1(q))$, где $F_1(q)$ – нормальная составляющая скорости отдельных точек на крыле,

$$N_0^{-1} = - \int_{-\infty}^x [\] d\tau,$$

n – внешняя нормаль к поверхности S ; S_p – проекция поверхности S на плоскость xu , P_d – перепад давления в диске D .

Далее, используя квадрупольную теорию А.Н. Панченкова [3], трёхмерная краевая задача (1) преобразуется в двухмерную задачу для уравнения Пуассона в области между крылом и экраном.

В работе [4] этот путь решения был использован, интегральное уравнение задачи (1)

редуцировано до краевой задачи для уравнения Пуассона. В нашем случае краевая задача для уравнения Пуассона будет иметь следующий вид:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \Phi(x, y) = \frac{\alpha \cdot (-1 + \phi_x^d) - \phi_y^d}{4 \cdot \bar{H} \cdot \lambda^2}, \quad (2)$$

где $\Phi(x, y) = \int_x^2 \gamma(\tau, y) d\tau$; $\bar{H} = h/2b$; $x \in [0, 2]$; $y \in [-1, 1]$; λ – относительное удлинение крыла

$$\Phi(x, \pm 1) = \Phi(2, y) = 0; \quad \frac{\partial \Phi(0, y)}{\partial x} = 0.$$

Решив уравнение (2), можно найти $\gamma(x, y) = -\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x}$, то есть распределение плотности двойного слоя γ по поверхности S_p . После этого можно найти коэффициенты подъемной силы и момента крыла C_y и C_m по следующим формулам:

$$\begin{aligned} C_y &= \lambda \cdot \int_{-1}^1 \int_0^2 \gamma(\xi, \eta) d\xi d\eta, \\ C_m &= \lambda \cdot \int_{-1}^1 \int_0^2 \gamma(\xi, \eta) \xi d\xi d\eta \end{aligned} \quad (3)$$

В работе [4] был произведен расчет зависимости коэффициента подъемной силы $C_y(\alpha)$ от угла в присутствии диска диполей. Далее был выполнен расчет зависимости коэффициента подъемной силы $C_y(\alpha)$ от угла атаки крыла с такими же параметрами, но в отсутствии диска диполей. На основании выполненных расчетов была введена поправка для определения коэффициента влияния диска диполей на подъемную силу крыла в зависимости от угла атаки в виде функции $K(\alpha) = \frac{C_y^p(\alpha)}{C_y(\alpha)}$. Зависимость полученной поправки $K(\alpha)$ от угла атаки представлена на рис. 2.

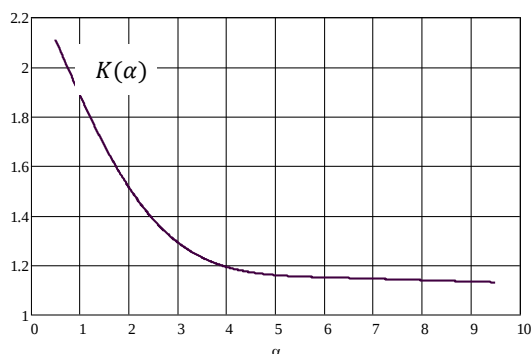


Рис. 2. Коэффициент влияния диска диполей на подъемную силу прямоугольного бестелесного крыла вблизи опорной поверхности в зависимости от угла атаки

Вычисления осуществлялись для комплекса крыло – диск диполей при следующих параметрах: $\lambda = 1$, $\beta = 10^\circ$, $\bar{h} = 0.015$, перепад давления в диске $\gamma_d = -12.631$ (характеристики пассажирского экраноплана «Волга-2»).

Проведенные расчёты показали, что скорости, вызванные диском диполей, довольно быстро стремятся к нулю при удалении от диска. Однако в целом влияние диска на коэффициент подъемной силы заметно и это влияние тем больше, чем меньше угол атаки крыла.

Использованный алгоритм является достаточно сложным. При использовании описанной методики для расчёта только одной точки надо численно решить краевую задачу (2), затем, применив бикубический сплайн из полученного набора чисел определить функцию $\gamma(x, y)$ и, наконец, по формулам (3) вычислить коэффициенты подъемной силы и момента. При определении производных коэффициентов по отстоянию и по углу тангажа трудоёмкость расчётов возрастает многократно.

Все это требует использования принципиально иной методики моделирования, которая будет базироваться на более существенных допущениях, но, тем не менее, давать достаточно достоверные результаты.

Приближенный расчёт подъемной силы при полете вблизи опорной поверхности в затопленной струе от движителей экраноплана (гидравлическая задача)

В работе [1] показана расчетная схема приближенного учета влияния турбулентной струи от движителей экраноплана на подъемную силу крыла вблизи опорной поверхности.

Как показали расчеты, выполненные для пассажирского экраноплана «Волга-2», и их сравнение с натурным экспериментом, выполненное в работе [2], основную часть в выражении для подъемной силы допустимо определять из гидравлической задачи о поле скоростей и давлений в пространстве, ограниченном плоским экраном и опорной поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающих движителей экраноплана (рис. 1 а, б).

Алгоритм расчетных операций включает в себя последовательное нахождение скорости воздуха в диске движителя, затем определение параметров турбулентной струи в районе передней кромки крыла, далее расчет части расхода воздуха попадающего под крыло в данном месте, далее расчет «входного» и «выходного» сечения щели между крылом и экраном и определение с помощью уравнения неразрывности и уравнения Бернулли дополнительного давления воздуха под крылом, обусловленного поддувом [11, 12].

Неизвестную скорость воздуха в диске движителя можно определить в соответствии с теорией идеального движителя по известным зависимостям [5]:

$$V_{to} = V_0 \beta_n \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{\gamma_d}{\beta_n}} - 1 \right) + 1 \right], \quad (4)$$

где

$$\beta_n = (r_{dn}/r_{dv})^2; \quad \gamma_d = 2T_{dv}/(\pi r_{dn}^2 \rho V_0);$$

r_{dn} , r_{dv} – радиусы выходного сечения насадки на движитель и внутреннего сечения в диске винта; T_{dv} – упор (тяга) движителя экраноплана; ρ – плотность воздуха; V_0 – скорость движения экраноплана.

Расход воздуха Q_0 через сечение выхода из движителя экраноплана находим так:

$$Q_0 = \pi r_{dn}^2 V_{to}. \quad (5)$$

Используем известные соотношения для средней скорости воздуха V_x на отстоянии от места истечения струи (см. рис. 1, а) и для расхода в ядре

струи Q , полученные в рамках классической теории турбулентной затопленной струи [6]

$$Q = 1,5Q_0 \frac{x_1 + r_{dH}/tg\alpha}{r_{dH}};$$

$$V_x = \frac{Q}{\pi R_{dx}^2};$$

$$R_{dx} = x_1 tg\alpha + r_{dH},$$

где α – угол расширения ядра турбулентной затопленной струи ($\alpha \approx 150$, [6]); R_{dx} – радиус ядра турбулентной струи на расстоянии x_1 от места ее истечения.

В рамках принятого допущения приближенно будем считать, что весь воздух Q_{bx}^i в сечении струи ниже передней кромки поступает в подкупольное пространство (рис. 1, б). Тогда полную величину расхода воздуха турбулентной струи от движителей экраноплана под крылом Q_{bx} получим, суммируя величины Q_{bx}^i от всех движителей

$$Q_{bx} = \sum_{i=1}^n Q_{bx}^i. \quad (7)$$

Осреднённая входная скорость потока будет равна:

$$V_{bx} = Q_{bx}/S_{bx}. \quad (8)$$

Основываясь на уравнении неразрывности среднюю выходную скорость потока в выходном сечении определим следующим соотношением

$$V_{bvx} = Q_{bx}/S_{bvx}. \quad (9)$$

Тогда дополнительное давление от поддува в подкупольном пространстве определится на основании уравнения Бернулли:

$$\Delta p = p_{bx} - p_{bvx} = \frac{\rho}{2} (V_{bx}^2 - V_{bvx}^2), \quad (10)$$

где p_{bx} , p_{bvx} – давления во входном и выходном сечениях рассматриваемого канала.

С учетом выражений (8) и (9) окончательно получаем:

$$\Delta p = p_{bx} - p_{bvx} = \frac{\rho}{2} (V_b^2 - V_{bvx}^2), \quad (11)$$

где $V_b = V_{bx} \mu$, μ – коэффициент, учитывающий отклонение расходов Q_{bx} и Q_{bvx} от расчетных значений из-за частичного выхода воздуха через входное отверстие и отражения части турбулентной струи от экрана. Этот коэффициент может быть определен для конкретной конфигурации экраноплана экспериментальным методом, например взвешиванием экраноплана, или его модели, с работающими движителями.

На основании выражения (11) прирост к подъемной силе крыла равен

$$Y_{вп} = \Delta p \cdot S_{кр} \quad (12)$$

и существует только тогда, когда величина D_s положительна

$$D_s = \left(1 - \frac{S_{bx}^2}{S_{bvx}^2}\right) > 0. \quad (13)$$

Расчеты показывают, что величина D_s положительна в крайне малом диапазоне отстояний крыла от опорной поверхности и существенно зависит от геометрии крыла в плане и конфигурации законцовочных шайб.

В работе [2] данный алгоритм был опробован в расчете поддувной силы пассажирского экраноплана «Волга-2» и результат был сопоставлен с натурным экспериментом, проведенным Центральным конструкторским бюро по судам на

подводных крыльях им. Р. Е. Алексеева. Результаты расчета показаны на рис. 3.

На рисунке 3, а и на рисунке 3, б представлены результаты расчетов поддувной подъемной силы (3, а) и положение центра давления (3, б) по описанной выше методике в зависимости от угла отклонения закрылка для пассажирского экраноплана «Волга-2», установленного на весах с движителем, работающим на номинальном скоростном режиме.

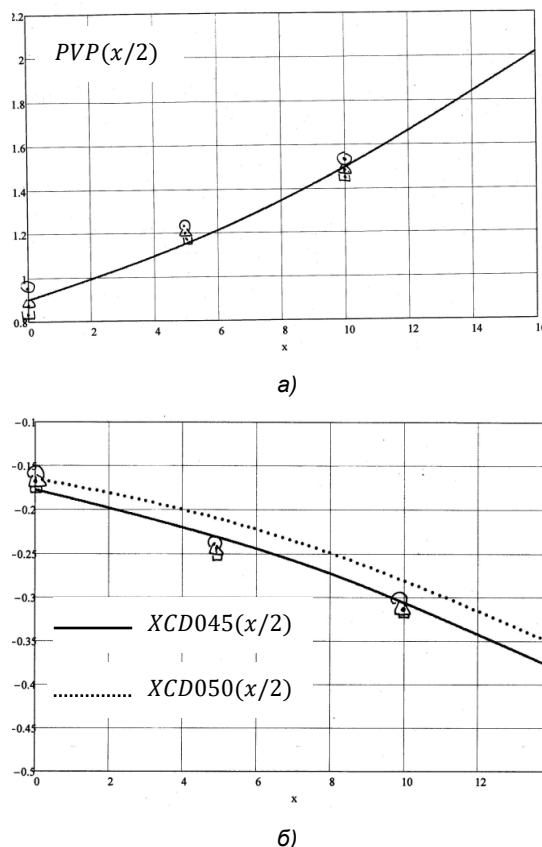


Рис.3. а) PVP – подъемная сила на стоянке пассажирского экраноплана «Волга-2» в зависимости от угла отклонения закрылков с работающим движителем;
б) XCD – положение центра давления в зависимости от угла отклонения закрылков, сплошная линия – $x_{cp}=0.45$, пунктир – $x_{cp}=0.5$;
▲ – натурный эксперимент.

В выполненных расчетах эмпирический коэффициент μ подобран по наибольшему совпадению результатов расчета с экспериментом ($\mu = 0,6$). Для нахождения координаты центра давления $x_{ц.д.}$ экраноплана необходимо знать точку приложения поддувной подъемной силы по длине судна. Так как по своей природе эта сила близка силе от статической воздушной подушки, то логично предположить, что точка приложения этой силы расположена в соответствии с положением центра тяжести площади горизонтальной проекции крыла (для пассажирского экраноплана «Волга-2» это величина $\bar{x}_{вп} = -0,5$). Однако, из-за отличия реального течения потоков в районе щелей по периметру крыла от идеальной модели, эта величина оказывается иной [9, 10]. На рис. 2 расчетные данные, совпадающие с экспериментом, соответствуют $\bar{x}_{вп} = -0,45$. Однако, как отмечено в

[2], на крейсерской скорости сопоставление с экспериментом дает лучшие результаты, когда $\bar{x}_{вп}$ ближе к центру тяжести площади проекции крыла на опорную поверхность.

Оценка влияния воздушного поддува под крылья экраноплана при его старте

Влияние воздушного поддува под крылья экраноплана при его старте на характеристики устойчивости продольного движения корпуса такого судна проявляет себя через существенную зависимость дополнительной подъемной силы $Y_{вп}$, обусловленной поддувом, от положения крыла с законцовками относительно опорной поверхности. На геометрию пространства между крылом с законцовками и опорной поверхностью, очевидно, влияют расстояние между аппаратом и экраном h , а также угол тангажа ϑ . Именно от этих величин зависит как величина $S_{вх}$, так и величина $S_{вых}$. Изменим выражение для силы (12) с учетом формул (11) и (13):

$$Y_{вп} = q_{вп} D_S, \quad (14)$$

где

$$q_{вп} = \frac{1}{2} \rho V_{вх}^2 S_{кр}.$$

Тогда производные $Y_{вп}$ по высоте h и по тангажу ϑ будут иметь следующий вид:

$$Y_{вп}^{h,\vartheta} = q_{вп} D_S^{h,\vartheta}, \quad (15)$$

$$D_S^{h,\vartheta} = 2 \frac{S_{вх}^2}{S_{вых}^2} \left(\frac{S_{вых}^{h,\vartheta}}{S_{вых}} - \frac{S_{вх}^{h,\vartheta}}{S_{вх}} \right).$$

Для расчета производных в выражениях (15) необходимы геометрические параметры входных и выходных площадей под крыльями в зависимости от высоты h и угла тангажа ϑ . Эти параметры должны быть определены по чертежам экраноплана.

Дополнительный опрокидывающий момент от силы $M_{звп}$, образующийся от поддува воздуха под крылья экраноплана, можно определить, только если известно положение центра давления $X_{вп}$. Зная эту величину, дополнительный момент определим так:

$$M_{звп} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) Y_{вп}. \quad (16)$$

Так как координата центра давления слабо изменяется в зависимости от высоты полета экраноплана h и угла тангажа ϑ [2], то производные дополнительного продольного момента с некоторым приближением можно определить так:

$$M_{звп}^{h,\vartheta} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) Y_{вп}^{h,\vartheta}$$

или

$$m_{звп}^{h,\vartheta} = (x_{вп} - x_{ц.т.}) \bar{Y}_{вп}^{h,\vartheta}, \quad (17)$$

где

$$\bar{m}_{звп} = M_{звп} / G; \quad \bar{Y}_{вп} = Y_{вп} / G.$$

С учетом вышесказанного выражения для коэффициента связанности перемещений и условной метацентрической высоты в [7] примут следующий вид:

$$\frac{\Delta h}{\Delta \psi} = - \frac{\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{вп}^\vartheta}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{вп}^h},$$

$$H = -(\bar{m}_z^\alpha + \bar{m}_z^\vartheta + m_{звп}^\vartheta) \frac{\bar{m}_z^h + \bar{m}_{звп}^h}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{вп}^h} (\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{вп}^\vartheta), \quad (18)$$

где $\frac{\Delta h}{\Delta \psi}$ – коэффициент связанности перемещений по высоте полета h и углу дифферента ψ , H – условная метацентрическая высота, верхние индексы – знаки производных по этим переменным.

Формулы (18) и (19) являются базовыми расчетными выражениями для определения характеристик продольной остойчивости экранопланов с учетом поддува воздуха его двигателями под крыло с законцовками.

Заключение

Предложенная методика учёта влияния затопленной газовой струи от движителей экраноплана на аэродинамические характеристики крыла с законцовками в режиме полета у опорной поверхности, основанная на решении гидравлической задачи, существенно проще краевой задачи, использующей диполь в качестве модели движителей и может использоваться в инженерных расчётах.

Литература

- Орлов Ю.Ф. Приближенный расчет подъемной силы крыла вблизи опорной поверхности в струе от движителей. – В кн.: Асимптотические методы в теории систем / Ю.Ф. Орлов. – Иркутск, ИНЦ СО АН СССР, 1990. – с. 14 – 32.
- Антонов А.А., Орлов Ю.Ф., Соколов В.В. Особенности продольной остойчивости судна на динамической воздушной подушке «Волга-2». – В кн.: Асимптотические методы в теории систем. – Иркутск, ИНЦ СО АН СССР, 1990. – с. 200 – 218.
- Панченков А.Н. Квадрупольная теория крыла вблизи твердой границы // Асимптотические методы в динамике систем. Новосибирск: Наука, 1980, С. 5-116
- Химич С.А., Орлов Ю.Ф. Задача о движении крыла за диском диполей над твердой поверхностью // Труды Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексеева. 2014. №1. С. 53 – 58
- Русецкий А.А. Движители судов с динамическими принципами поддержания / А.А. Русецкий. – Л.: Судостроение, 1979. – 240 с.
- Ландау Л.Д., Лившиц В.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1990. – 736 с.
- Орлов Ю.Ф. К вопросу о статической устойчивости тел, движущихся вблизи жидкой или твердой поверхности. – В кн.: Асимптотические методы в механике / Ю.Ф. Орлов. – Иркутск, СЭИ СО АН СССР, 1979. – с. 88 – 106.
- Соколов В.В. Новое поколение крылатых судов // Судостроение. 1991. №1. С. 3 – 7
- Fevralskikh A.V., Kupchik V. Numerical Simulation of 3D Surfaces Icing Near the Moving Wall // Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2021. P. 269–281.

10. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Несущая система экраноплана схемы "тандем" и ее аэродинамические характеристики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 2(133). С. 193-208.
11. Экранопланы - транспортные суда XXI века / А.И. Маскалик, Р.А. Нагапетян и др. - Санкт-Петербург: Судостроение, 2005. - 576 с.
12. Хрунков С.Н., Лысенко Е.Л., Сеземин А.В., Ахмадбекова И.Х. Особенности работы газотурбинных двигателей на экранопланах // Транспортные системы. 2019. № 1 (11). С. 49-54.
13. Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В. Метод расчета коэффициента подъемной силы составного крыла экраноплана при полете у поверхности земли // НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА Вестник ВГАВТ Выпуск (1) 62 Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2020 С. 51-61.
14. Февральских А.В., Машкевич И.К., Лучков А.Н., Грамузов Е.М. Определение аэродинамических характеристик крыла экраноплана с использованием технологий машинного обучения. // Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ № 2 часть 1, 2023. Сквозной номер 60. С. 295 – 303.

References

1. Orlov Yu.F. Priblizhennyi raschet pod'emnoy sily kryla vblizi opornoj poverkhnosti v strue ot dvizhiteley [Approximate calculation of the lifting force of a wing near the supporting surface in the jet from the propulsors]. – V kn.: Asimptoticheskie metody v teorii sistem. Irkutsk, INTs SO AN SSSR, 1990. s. 14-32.
2. Antonov A.A., Orlov Yu.F., Sokolov V.V. Osobennosti prodol'noy ustoychivosti sudna na dinamicheskoy vozdushnoy podushke «Volga-2» [Features of longitudinal stability of the dynamic air cushion vessel "Volga-2"]. V kn.: Asimptoticheskie metody v teorii sistem. Irkutsk, INTs SO AN SSSR, 1990. s. 200-218.
3. Panchenkov A.N. Kvadrupol'naya teoriya kryla vblizi tverдой granitsy. Asimptoticheskie metody v dinamike system [Quadrupole wing theory near a solid boundary]. Novosibirsk: Nauka, 1980, S. 5-116
4. Khimich S.A., Orlov Yu.F. Zadacha o dvizhenii kryla za diskom dipoley nad tverдой poverkhnost'yu [The problem of the motion of a wing behind a disk of dipoles over a solid surface]. Trudy Nizhegorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. R.E. Alekseeva. 2014. №1. S. 53-58
5. Rusetskiy A.A. Dvizhiteli sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya [Ship propulsors with dynamic propulsion principles]. L.: Sudostroenie, 1979. 240 s.
6. Landau L.D., Livshits V.M. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. M.: Nauka, 1990. 736 s.
7. Orlov Yu.F. K voprosu o staticheskoy ustoychivosti tel, dvizhushchikhsya vblizi zhidkoy ili tverдой poverkhnosti [On the issue of static stability of bodies moving near a liquid or solid surface]. – V kn.: Asimptoticheskie metody v mekhanike. Irkutsk, SEI SO AN SSSR, 1979. s. 88-106.
8. Sokolov V.V. Novoe pokolenie krylatykh sudov [New generation of cruise ships]. Sudostroenie. 1991. №1. S.3-7
9. Fevral'skikh A.V., Kupchik V. Numerical Simulation of 3D Surfaces Icing Near the Moving Wall. Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2021. P. 269–281.
10. Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. Nesushchaya sistema ekranoplana skhemy "tandem" i ee aerodinamicheskie kharakteristiki [Tandem ekranoplan support system and its aerodynamic characteristics]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. T. 22, № 2(133). S. 193-208.
11. Ekranoplans - transport vessels of the 21st century. A.I. Maskalik, R.A. Nagapetyan and others. Sankt-Peterburg: Sudostroenie, 2005. 576 p.
12. Khrunkov S.N., Lysenko E.L., Sezemin A.V., Akhmadbekova I.Kh. Peculiarities of operation of gas turbine engines on ekranoplanes. Transport systems. 2019. № 1 (11). P. 49-54.
13. Лучков А.Н., Чебан Е.Ю., Журавлев Е.В. Метод расчета коэффициента подъемной силы составного крыла экраноплана при полете у поверхности земли // НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА Вестник ВГАВТ Выпуск (1) 62 Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2020 С. 51-61.
14. Февральских А.В., Машкевич И.К., Лучков А.Н., Грамузов Е.М. Определение аэродинамических характеристик крыла экраноплана с использованием технологий машинного обучения. // Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ № 2 часть 1, 2023. Сквозной номер 60. С. 295 – 303.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ваганов Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Аэрогидродинамики, прочности машин и сопротивления материалов, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: al.vaganov2013@yandex.ru

Орлов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Прикладная математика, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: yorlov@mts-nn.ru

Крайнов Артем Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры энергетических установок и тепловых двигателей, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155, Нижний Новгород, 24, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Михеева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Alexander B. Vaganov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Aero-Hydrodynamics, Machine Strength and Material Resistance, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603950, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: al.vaganov2013@yandex.ru

Yuri F. Orlov, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor, Professor of the Department Applied Mathematics, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 603155, Nizhny Novgorod, Minina str., 24, e-mail: yorlov@mts-nn.ru

Artem A. Krainov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Power Plants and Heat Engines, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, 603155, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: art.kr-91@mail.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Ship Design and Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2024.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

TECHNOLOGY OF SHIP BUILDING. SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Научная статья

УДК 629.5.06

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.057>

Экспериментальные исследования процессов первичной обработки загрязненных вод гидродинамической кавитацией

Мизгирев Д.С.¹ mizgirevds@yandex.ru, Сугаков В.Г.¹ sugakov_vg@mail.ru, Гурьянов Н.М.¹ gurnikol@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В данной статье представлен анализ классификации устройств, предназначенных для генерации кавитационных каверн и суперкаверн, а также рассматриваются преимущества и недостатки процессов, происходящих в гидродинамических кавитаторах, используемых в судовых станциях приготовления питьевой воды (СППВ). Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик гидродинамического кавитатора, проведенных на стенде, который моделирует работу определенной части судовой СППВ, представляющей собой комплекс электронасосного агрегата, гидродинамического кавитатора и озоногенерирующей УФ - установки. Проведены экспресс - микробиологические исследования на обнаружение кишечной палочки для подтверждения правильности выбранных режимов работы аппарата. Экспериментально доказан эффект обеззараживания загрязненных вод за счет гидродинамической кавитации, выявлен синергетический эффект при одновременном использовании кавитационной обработки и озонирования малой дозой активного окислителя. Исследовано влияние режимов работы аппарата на температурные параметры и массовую концентрацию общего железа в пробах воды. Предлагается реализация технологии с помощью нового единого устройства комплексного обеззараживания, использующего последовательность процессов озонирования и УФ - облучения.

Ключевые слова: кавитация, озонирование, УФ - излучение, активированные окислительные технологии, станция приготовления питьевой воды, коронный разряд, гидродинамический кавитатор.

Для цитирования: Мизгирев Д.С., Сугаков В.Г., Гурьянов Н.М. Экспериментальные исследования процессов первичной обработки загрязненных вод гидродинамической кавитацией. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 38—47. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.057

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.057>

Experimental studies of the processes of primary treatment of contaminated waters by hydrodynamic cavitation

Dmitry S. Mizgirev¹ mizgirevds@yandex.ru, Valerii G. Sugakov¹ sugakov_vg@mail.ru

Nikolai M. Gurianov¹ gurnikol@yandex.ru.

¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation, Nizhniy Novgorod

Abstract. This article presents an analysis of the classification of devices designed to generate cavitation caverns and supercaverns, and discusses the advantages and disadvantages of the processes occurring in hydrodynamic cavitators used in ship drinking water preparation stations (SDPWS). The article presents the results of experimental studies of the hydrodynamic cavitator characteristics conducted on a stand that simulates the operation of a certain part of the ship SDPWS, which is a complex of an electric pump unit, a hydrodynamic cavitator and an ozone-generating UV unit. Express microbiological studies were carried out to detect E. coli to confirm the correctness of the selected operating modes of the device. The effect of disinfection of contaminated water due to hydrodynamic cavitation was experimentally proven, a synergistic effect was revealed with the simultaneous use of cavitation treatment and ozonation with a small dose of an active oxidizer. The effect of the device operating modes on the temperature parameters and mass concentration of total iron in water samples was studied. It is proposed to implement the technology using a new single device for complex disinfection, using a sequence of ozonation and UV irradiation processes.

Keywords: cavitation, ozonation, UV radiation, activated oxidation technologies, drinking water preparation station, corona discharge, hydrodynamic cavitator.

For citation: Dmitry S. Mizgirev, Valerii G. Sugakov, Nikolai M. Gurianov, Experimental studies of the processes of primary treatment of contaminated waters by hydrodynamic cavitation. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 38—47. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.057

Введение

Одной из перспективных современных технологий физико-механической очистки загрязненных вод является кавитация. В общем случае, при протекании данного явления в жидкой среде вследствие изменения давления образуются и схлопываются пузырьки (каверны), заполненные паром, газом или их смесью [1]. Вследствие интенсивности активного физического воздействия, а также скачков температуры происходит разрушение клеточных мембран органических соединений, коллоидов и микроорганизмов, а также вирусов. Таким образом, гидродинамическая кавитация может применяться как на стадии первичной обработки загрязненных вод, так и на стадии доочистки и обеззараживания.

Эффективное приготовление питьевой воды (ПВ) с помощью современных станций приготовления питьевой воды (СППВ), как правило, реализуется с применением комплексного подхода к проектированию. Таким образом, для оценки возможности применения кавитации в технологическом процессе СППВ необходимо экспериментально выяснить эффективность кавитационного обеззараживания загрязненных вод, а также исследовать сопутствующие процессы изменения характеристик обрабатываемой жидкости, которые также могут быть использованы в различных судовых системах.

Генерирование кавитации гидродинамическими условиями

Образование кавитации возможно вследствие как акустического излучения, когда каверны возникают от прохождения в жидкости звуковых волн необходимой частоты и амплитуды, так и в результате изменения гидродинамических условий протекания потока жидкости – при понижении давления за счет роста скорости потока [2].

Устройства для генерации кавитационных процессов классифицированы в виде схемы, представленной на рис. 1

Следует отметить, что акустические кавитаторы отличаются сложностью и высокой стоимостью, значительным энергопотреблением, необходимостью специализированного высококвалифицированного обслуживания, что ограничивает возможность их применения в составе судовых систем. С учетом ограничений судовых условий в составе СППВ, практически, может быть использован гидродинамический метод генерирования кавитации путем образования специализированных гидравлических конструкций.

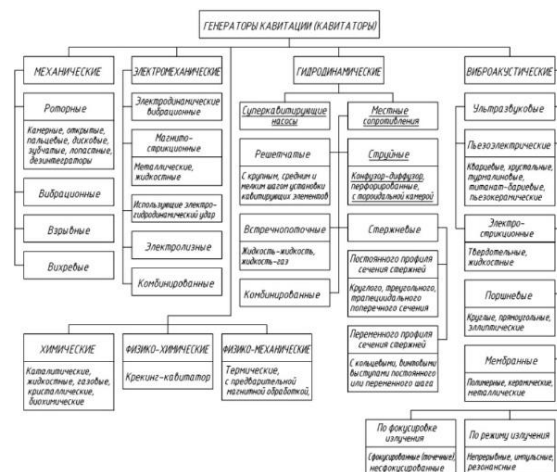


Рис. 1 – Классификация кавитационных генераторов

В данных устройствах возможно протекание сразу двух типов кавитационных процессов:

- профильного, реализуемого на твердых стенках хорошо обтекаемых элементов местных сопротивлений. При этом наблюдается выраженный эрозионный износ ограничивающих поток стенок гидродинамических конструкций, что является существенным недостатком;

- срывного, происходящего в вихрях за плохо обтекаемыми элементами гидравлических устройств, при этом зародыши каверн образуются как на твердых ограничивающих поток стенках, так и внутри него. Достоинством данного типа является равномерность распределения каверн в объеме жидкости, что необходимо для ее эффективной обработки [15].

С целью достижения высокого эффекта обеззараживания необходимо, чтобы в кавитаторе происходили оба типа кавитационных процессов, что должно достигаться рациональной конструкцией (например, патент РФ RU 2269386 С1 «Генератор гидродинамических колебаний»).

Предварительные исследования показывают, что подобные устройства позволяют достичь высокого уровня надежности и качества процессов обеззараживания при относительно низких энергозатратах (сравнительно малых давлениях входящего потока рабочей жидкости), показывают работоспособность в тяжелых условиях (при значительных давлениях сжатия), обеспечивают эжекцию жидких и газообразных реагентов в довольно широком диапазоне рабочих характеристик. Это создает выраженные предпосылки для использования подобных аппаратов вместо штатных эжекторов судовых СППВ, что позволит повысить санитарную надежность судна в целом при сравнительно малых капитальных затратах [3].

Экспериментальные исследования

Для выполнения задач по определению характеристик гидродинамического кавитатора, входящего в состав СППВ, потребовалось разработать специальный стенд. Созданный в лаборатории ФГБОУ ВПО «ВГУВТ» стенд имитирует работу части СППВ, представляя собой комплекс электронасосного агрегата, гидродинамического

кавитатора и озоногенирующей установки на основе ультрафиолетового излучения.

Внешний вид стенда №1 приведен на рис. 2.



Рис.2– Внешний вид экспериментального стенда (емкости и часть трубопроводов демонтированы)

1 – шкаф питания озоногенирующей УФ-установки; 2 – ротаметр; 3 - лампа УФ-излучения; 4 – электронасос; 5 – клапан редукционный; 6 – шланг компримированного воздуха; 7 – мановакууметр; 8 – счетчик расхода жидкости; 9 – манометры; 10 – кавитатор гидродинамический; 11 – штуцер пробоотборный; 12 – патрубок обрабатываемой воды.

Основные характеристики стенда при выполнении экспериментов поддерживались постоянными вследствие настройки перед испытаниями на водопроводной воде постоянной температуры, а также при постоянной температуре окружающего воздуха.

Расчет, подбор и изготовление отдельного оборудования стенда произведены по известным уравнениям и имеют основные характеристики, представленные ниже.

Электронасос TP 100E: $Q_n = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; $P_n = 14500 \text{ кПа}$; $H_{\text{max}} = 150 \text{ м}$; $H_{\text{min}} = 62 \text{ м}$; $N = 2,2 \text{ кВт}$.

Озоногенирующая лампа УФ-излучения: $N_{\text{уф}} = 60 \text{ Вт}$; $Q_{\text{ос}} = 1,4 \text{ м}^3/\text{ч}$; $g_{\text{уф}} = 30 \text{ мДж/см}^2$ при 60% светопропускании; тип излучателя GPH 893 T5 VH/NO.

Поиск эффективного режима кавитатора произведен с использованием предельных кривых Эше [4], отражающих нелинейную зависимость между частотой акустической волны и пороговым давлением, при котором возникает кавитация. Для воды стабильная кавитация возникает при частотах $f = (1...30) \text{ кГц}$ [2, 11, 12].

Исследования выполнены с применением прибора ДСА-2001 «ИНКОТЕС», предназначенного для вибрационной диагностики технических средств, в полуавтоматическом режиме. Варьируемые в ходе эксперимента параметры и их пределы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Пределы изменения рабочих параметров кавитатора

Параметр	Предел изменения
Давление на входе в аппарат p_p , кПа	400; 600; 800
Расход эжектируемого газа Q_3 , м ³ /ч	0,00; 0,05; 0,15; 0,30

В ходе предварительного исследования настройки и калибровки измерительного комплекса, с учетом схемы размещения датчиков, представленной на рис. 3, на корпусе аппарата была зафиксирована вибрация в радиальном направлении (точка 4), на порядок превышающая уровни в остальных точках измерения.

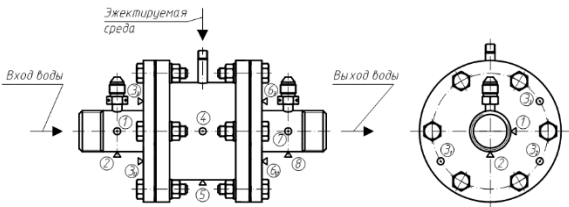


Рис. 3 – Схема измерения вибрации кавитатора

Это явление можно объяснить высокой интенсивностью ударных импульсов, возникающих из-за образования и схлопывания каверн, а также значительной скоростью потока в осевом направлении аппарата, которая не позволяет распространению ударной волны к торцевым стенкам рабочей камеры.

Таким образом, положение точки 4 было установлено в качестве базовой, результаты экспериментов при полуавтоматическом режиме регистрации параметров представлены на рис. 4-8.

На рис. 9 представлены результаты эксперимента, обработанные по среднеквадратичному (СКЗ) значению виброускорения $a_{\text{скз}}$ при пиковой частоте f и СКЗ виброускорения по спектру.

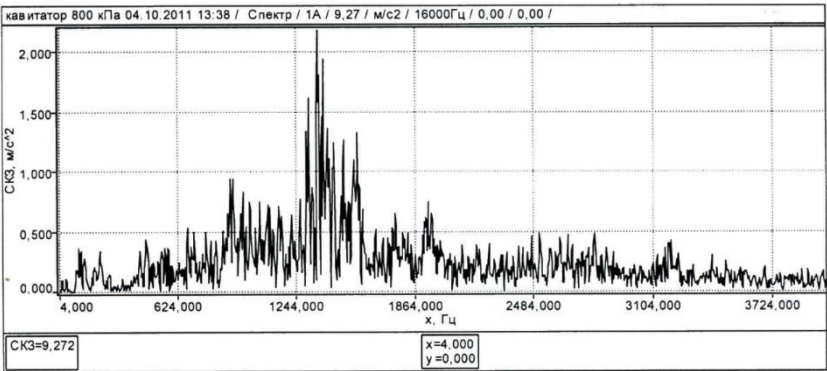


Рис.4 – Виброграмма при $p_p = 800 \text{ кПа}$ без эжектирования

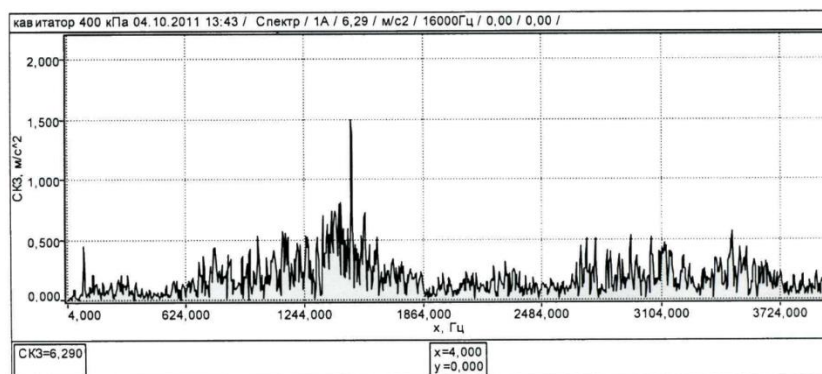


Рис.5 – Виброграмма при $p_p = 400$ кПа без эжектирования

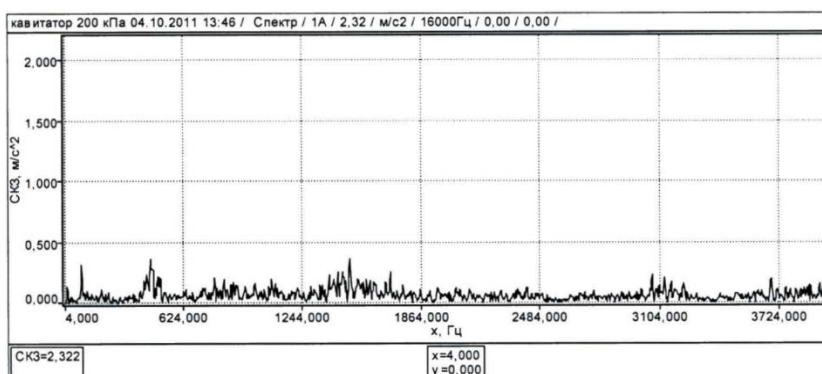


Рис.6 – Виброграмма при $p_p = 200$ кПа без эжектирования

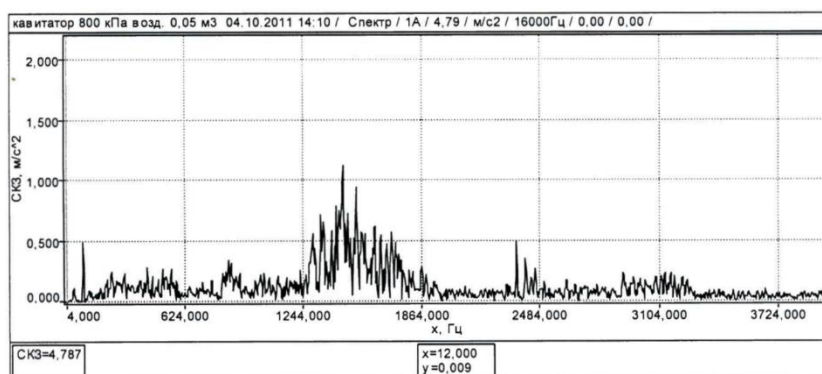


Рис.7 – Виброграмма при $p_p = 800$ кПа; $Q_s = 0,05$ м³/ч

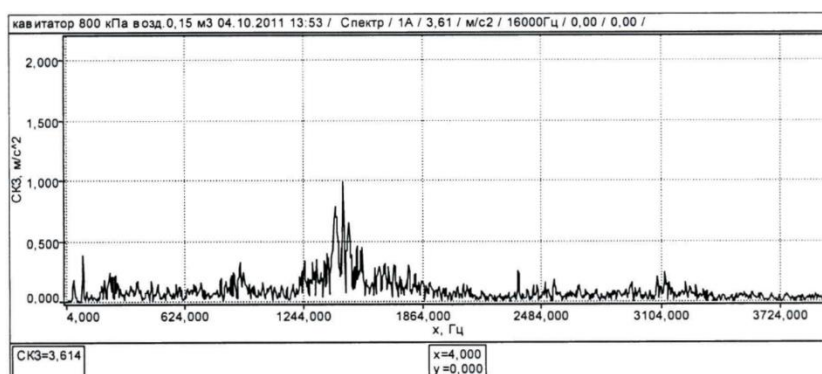


Рис.8 – Виброграмма при $p_p = 800$ кПа; $Q_s = 0,15$ м³/ч

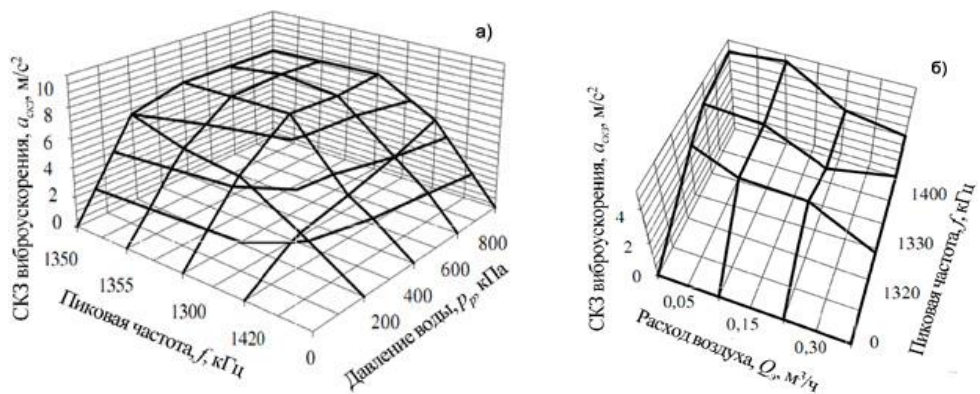


Рис. 9 – Вибрация на корпусе кавитатора в зависимости от режима работы устройства
а) без эжекции атмосферного воздуха; б) с эжекцией



Рис. 10 – Результаты экспресс микробиологических исследований
а – проба № 1; б – проба № 2; в – проба № 3.

Результаты эксперимента показывают, что уровень вибрации, а, следовательно, и кавитации при увеличении давления воды сначала возрастает, а затем стабилизируется в диапазоне давлений $p_p=(400...800)$ кПа, $p_{\approx} 30$ кПа. В противоположном направлении наблюдается изменение при эжекции воздуха: при $Q_{\approx} \leq 0,12$ м³/ч уровень виброускорения высок, но при увеличении расхода происходит резкое снижение.

Для проверки корректности назначенных режимов работы аппарата выполнены микробиологические исследования экспресс-методом на определение количественных показателей кишечной палочки по ТУ 6-091-85. Эксперимент проведен на пробах воды из р. Волга, взятых у причала паромной переправы г. Н. Новгород – г. Бор.

Результаты анализа представлены на рис. 10 и в таблице 3. Принята следующая нумерация проб: 1 - исходная вода; 2 - обработанная кавитатором без добавления реагентов; 3 - обработанная кавитатором с эжектированием озono-воздушной смеси с дозой 0,1 гОз/м³.

Таблица 3

Микробиологические исследования речной воды

	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3
Количество колоний, шт.	94	9	3
Количество бактерий, шт/см²	18 800	1800	600

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о выраженном эффекте первичного обеззараживания гидродинамической кавитацией, а также о проявлении явного синергетического эффекта при одновременном применении кавитации и слабого озонирования.

В процессе испытаний, как и ожидалось, был зафиксирован рост температуры циркулирующей воды в гидродинамическом кавитаторе, который превышал уровень нагрева, вызванного трением в электронасосе, локальными сопротивлениями и элементами трубопровода экспериментального стенда.

Исследовано влияние режимов работы аппарата на температуру, а также на массовую концентрацию общего железа в пробах воды C_{Fe} , определенную по ГОСТ 4011-72 без отстаивания и с выдержкой образцов. Результаты представлены в табл. 4 - 6, а также на рис. 11 и 12.

Для профессиональной и независимой оценки наблюдаемого явления были проведены консультации с к.х.н., доц. кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности ФБОУ ВПО «ВГУВТ» Ляпиной Н.Ш. и ст. преподавателем, ассистентом кафедры «Общей химии» ГБОУ ВПО «НГМА» Медведевой О.А.

Согласно общему мнению, наблюдающаяся картина (рис. 13 а) при проведении анализов проб без отстаивания вызвана наличием в исследуемом растворе избыточного растворенного кислорода и значительных перепадов температур, возникающих точно (на что указывает постоянство pH среды) и являющихся следствием высокоинтенсивных физических процессов в исследуемом аппарате.



Рис. 11 – Массовая концентрация общего железа без эжекции воздуха

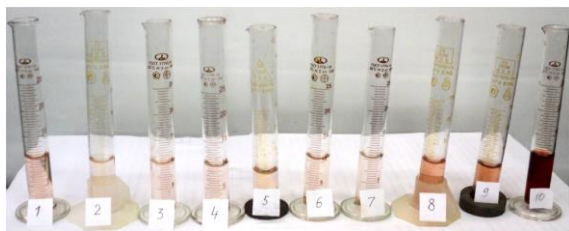


Рис. 12 – Массовая концентрация общего железа при эжекции атмосферного воздуха

Эти явления вызывают окисление растворенного оксида железа (II) FeO до оксида железа (III) Fe_2O_3 и необратимые изменения в характере гидролизных реакций между идентифицирующими реагентами. Из графика следует, что наибольшее изменение C_{Fe} наблюдается при давлениях $p_p \approx 400$ кПа, $p_5 = 25$ кПа, что свидетельствует об ускоренном протекании указанных химических процессов на этом режиме, а, следовательно, наличии здесь развитой гидродинамической кавитации, вызывающей интенсификацию. При этом дополнительная эжекция атмосферного воздуха (кривая 2) качественного влияния на процесс не оказывает.

Следует отметить, что данный режим предпочтителен и с экономической точки зрения т.к. его могут обеспечить наиболее распространенные и сравнительно дешевые судовые и общепромышленные насосы.

Результаты проведенных исследований открывают еще одну функцию гидродинамического кавитатора – для нагрева различных технологических сред (рис. 13). В частности, применительно к СППВ, это позволит избежать отпотевания и последующего пробоа и разрушения стеклянных диэлектрических труб озонаторных агрегатов, обеспечить надежную работу судовых систем при близких к отрицательным температурам окружающего воздуха, для подогрева поступающей потребителям очищенной воды (с целью экономии расхода греющего теплоносителя или электроэнергии) и т.д.

Таким образом, для судовых СППВ перспективна технология, которая позволит при быстрой переналадке оборудования обрабатывать воду, различную по своему исходному состоянию. Предлагается устройство, рассчитанное на производство воды питьевого и технического качества из пресной воды природных источников, а также централизованных и децентрализованных систем водоснабжения. Основопологающей технологией предлагаемого устройства являются процессы АОТ's (активированные окислительные технологии), которые имеют преимущества по сравнению с другими технологиями очистки, так как обладают синергетическим эффектом, и это доказано экспериментально.

Принципиальная схема устройства для обработки и приготовления питьевой воды приведена на рисунке 14.

Устройство включает в себя гидродинамический кавитатор, выполняющий функцию эжектора и цилиндрический корпус с основными функциональными элементами. Установленные внутри корпуса концентрические перегородки образуют контактную колонну, в верхней части которой установлен штуцер для отвода воздуха, зону фильтрации на насыпной гранулированной загрузке, а также зону обработки УФ - излучением, внутри которой установлены озонирующие элементы. Последние конструктивно состоят из стеклянного элемента с нанесенным на внутреннюю поверхность перфорированным токопроводящим слоем, закрытого диэлектрической крышкой с отверстиями для прохода атмосферного воздуха и отвода озono-воздушной смеси. Коронный разряд генерируется между центральной трубой и токопроводящим слоем посредством подключения к высоковольтному трансформатору. Озоно-воздушная смесь при этом через невозвращаемый клапан эжектируется гидродинамическим кавитатором [14].

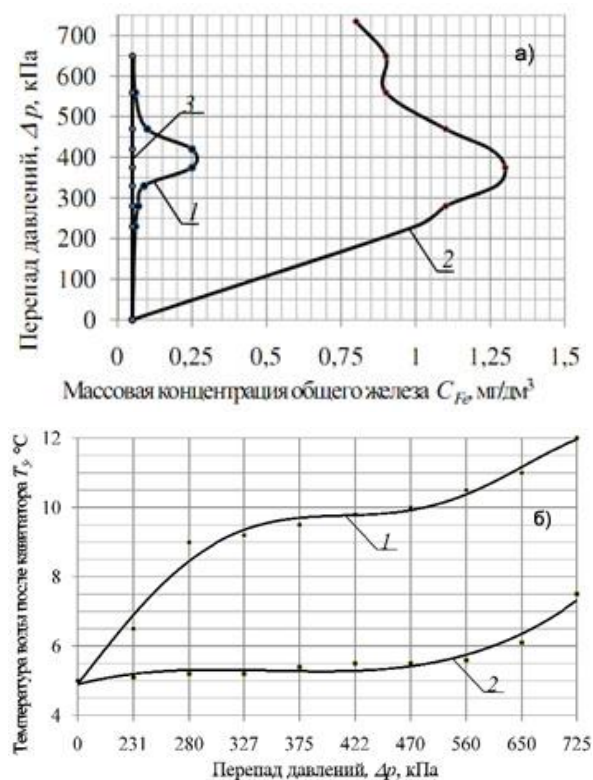


Рис. 13 – Влияние эжекции атмосферного воздуха на массовую концентрацию общего железа (а) и нагрев воды (б)

1 – без эжекции; 2 – при эжекции атмосферного воздуха; 3 – с аэрацией атмосферного воздуха

Таблица 4

Влияние кавитации на нагрев воды и массовую концентрацию общего железа без эжекции воздуха

№ пробы	Давление воды (избыточное)		Давление всасывания, p_s , кПа (абсолютное)	Температура воды		Расход воды Q_e , м ³ /ч	Массовая концентрация общего железа, C_{Fe} , мг/дм ³
	на входе p_p , кПа	на выходе p_s , кПа		перед кавитатором T_e , °C	после кавитатора T_s , °C		
1 (исходная)	-	-	-	4,0	4,0	-	менее 0,05
2	600	40	75	5,0	5,7	1,71	0,06
3	500	30	70	5,0	5,6	1,68	0,10
4	450	28	60	5,0	5,5	1,64	0,25
5	400	25	53	5,0	5,5	1,63	0,25
6	350	23	55	5,0	5,4	1,06	0,09
7	300	20	58	5,0	5,2	1,03	0,07
8	250	19	67	5,0	5,2	0,98	0,06

Таблица 5

Влияние кавитации на нагрев воды и массовую концентрацию общего железа при эжекции воздуха

Проба №	Давление воды (избыточное)		Температура		Расход		Массовая концентрация общего железа, C_{Fe} , мг/дм ³
	на входе p_p , кПа	на выходе p_s , кПа	перед кавитатором T_e , °C	после кавитатора T_s , °C	воды Q_p , м ³ /ч	эжектируемого воздуха $Q_{э}$, м ³ /ч	
1 (исходная)	-	-	4,0	4,0	-	-	менее 0,05
2	800	75	7,5	12,0	2,25	0,35	0,80
3	700	50	7,5	11,0	2,00	0,28	0,90
4	600	40	7,5	10,5	1,80	0,21	0,90
5	500	30	7,5	10,0	1,56	0,17	1,10
6	400	25	7,5	9,5	1,20	0,14	1,30
7	300	20	7,5	9,0	1,03	0,11	1,10
8 (выдержка 1 сут)	800	75	7,5	12,0	2,25	0,35	2,20
9 (выдержка 3 сут)	800	75	7,5	12,0	2,25	0,35	2,45
10 (кратность циркуляции 2)	800	75	7,5	26,0	2,25	0,35	3,50

Таблица 6

Влияние аэрации атмосферного воздуха на массовую концентрацию общего железа

Проба №	Давление воды (избыточное)		Температура воды перед кавитатором T_e , °C	Расход		Массовая концентрация общего железа, C_{Fe} , мг/дм ³
	на входе p_p , кПа	на выходе p_s , кПа		воды Q_p , м ³ /ч	эжектируемого воздуха $Q_{э}$, м ³ /ч	
1 (исходная)	-	-	4,0	-	-	менее 0,05
2	600	40	4,0	1,80	0,21	менее 0,05
3	500	30	4,0	1,56	0,17	менее 0,05
4	450	28	4,0	1,80	0,21	менее 0,05
5	400	25	4,0	1,56	0,17	менее 0,05
6	350	23	4,0	1,20	0,14	менее 0,05
7	300	20	4,0	1,03	0,11	менее 0,05
8 (выдержка 3 сут)	250	19	4,0	1,56	0,17	0,07

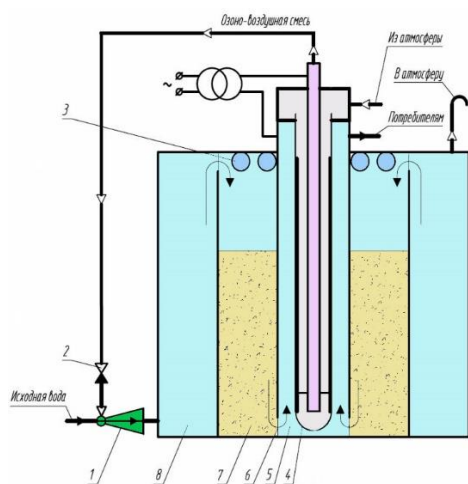


Рис. 14 – Принципиальная схема устройства

1 - гидродинамический кавитатор; 2 - не возвратный клапан; 3 - верхние переливные окна; 4 - стеклянная колба; 5 - зона обработки УФ-излучением; 6 - нижние переливные окна; 7 - фильтр; 8 - контактная колонна.

От существующих аналогов данное устройство отличается: не требуется дорогостоящий отдельный озонатор – вместо этого озонирующий элемент встроен в общую конструкцию устройства. Это значительно снизит массогабаритные показатели и энергопотребление СППВ. Кроме того, данное решение позволяет полезно использовать УФ - излучение коронного разряда в озонаторе не только для обеззараживания, но также и для разложения остаточного озона в обрабатываемой воде. Замена эжектора в составе системы на гидродинамический кавитатор позволяет использовать синергетический

эффект при совместной обработке кавитацией и озонированием.

Заключение

Первичная обработка весьма эффективна, однако необходимо проведение комплексных исследований СППВ по предлагаемой технологии с использованием кавитации и УФ - излучения. Отмечено, что водородный показатель pH увеличивается с увеличением времени кавитационного воздействия. Также из результатов эксперимента следует, что уровень вибрации связанный с интенсивностью кавитации с ростом давления воды сначала возрастает, а затем стабилизируется при определенных значениях. Результаты проведенных исследований открывают возможности для использования гидродинамического кавитатора с функцией подогревателя технологических сред, что также актуально для СППВ. Предложенное применение устройства комплексной обработки озонированием и УФ - излучением позволит обрабатывать воду, различную по своему исходному состоянию. Универсальность указанного воздействия на все болезнетворные микроорганизмы, неизменность результата при любых значениях pH и температуры воды, отсутствие вероятности передозировки и необходимости контролировать остаточное содержание применяемых реагентов, удешевление водоподготовки за счет сокращения энергопотребления, затрат на закупку реагентов, отсутствие риска утечки токсичных химикатов, работа в автоматическом режиме обеспечивает технологическое преимущество комплексного подхода.

Литература

1. Курников А.С., Мизгирев Д.С. Вопросы проектирования современных судовых систем очистки сточных вод // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2012. №1 (13)
2. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – М.: МИР, 1975. – 98 с.: ил.
3. Мизгирев, Д. С. Совершенствование судовых станций приготовления питьевой воды с использованием синергетического эффекта активированных окислительных технологий / Д. С. Мизгирев, Н. М. Гурьянов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 4-1(58). – С. 40-45.
4. Курников А.С., Мизгирев Д.С., Михеева Т.А. Научное обоснование технических решений создания и совершенствования природоохранного оборудования для водного транспорта и предприятий речного флота: монография / А.С. Курников, Д.С. Мизгирев, Т.А. Михеева. – Н.Новгород: изд-во ФБОУ ВПО ВГАВТ, 2017. – 436 с.; ил.
5. Рождественский В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.: ил.
6. Иванов Л.А. О применении кавитаторов (обзорная статья) / Л.А. Иванов // Энергосбережение: Энергосберегающие технологии для промышленных предприятий. – Миасс, 2008. – С. 28-38.
7. Оценка эффективности новых технических решений по экономии топливных ресурсов на речных судах: отчет по НИР / ФГОУ ВПО «ВГАВТ»; Рук. В.А. Кутыркин, № 944607. – Н. Новгород: ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 1994. – 113 с.
8. Курников А.С. Создание математических моделей систем обеспечения обитаемости судов: монография / А.С. Курников – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2002. – 156 с.: ил.
9. Алексеев С.Е. Озонирование в технологии очистки сточных вод / С.Е. Алексеев // Озон и другие чистые окислители. Наука и технологии: Материалы 23-го Всероссийского семинара / Под ред. В.В. Лунина, В.Г. Самойловича и С.Н. Ткаченко – М.:МГУ, 2002. – С.38-50.
10. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях // Физическая акустика / Г. Флинн; под ред. У. Мезона – Т. 1 – М.: Мир, 1967. – 428 с.: ил.
11. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк; отв. ред. В.А. Акулиничев, Л.Р. Гаврилов // Тихоокеан. океанол. ин-т им. В.И. Ильичева ДВО РАН. – М.: Наука, 2008. – 271 с.: ил.
12. Промтов М.А. Кавитация / М.А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета- Тамбов: Изд-во ФБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – № 4. – С. 28-36.

13. Харитонов Ю.Я. Аналитическая химия: учебник для студентов ВУЗов обучающихся по фармацевтическим и не химическим специальностям / Ю.Я. Харитонов. – Кн. 2. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2001 – 559 с.
14. Патент № 2705355 С1 Российская Федерация, МПК C02F 9/06, C02F 1/78, C02F 1/46. устройство для очистки и приготовления питьевой воды : № 2019112291 : заявл. 23.04.2019 : опубл. 06.11.2019 / Д. С. Мизгирев, Н. М. Гурьянов. – EDNWBVVJ.
15. Мизгирев, Д. С. Анализ технических решений судовых систем питьевой воды / Д. С. Мизгирев, Н. М. Гурьянов // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 77-89.

References

1. Kurnikov A.S., Mizgirev D.S. Voprosy proektirovaniya sovremenny sudovy sistem ochistki stochny vod [Issues of designing modern marine wastewater treatment systems], Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova. 2012. №1 (13).
2. Pirsol I. Kavitacija[Cavitation]; per. s angl. Ju.F. Zhuravleva. M., MIR, 1975, 98 s.
3. Mizgirev, D. S. Sovershenstvovanie sudovyh stancij prigotovleniya pit'evoy vody s ispol'zovaniem sinergeticheskogo jeffekta aktivirovannyh oksiditel'nyh tehnologij [Improvement of ship stations for the preparation of drinking water using the synergistic effect of activated oxidation technologies], Morskie intellektual'nye tehnologii. 2022., № 4-1(58). S. 40-45.
4. Kurnikov A.S., Mizgirev D.S., Miheeva T.A. Nauchnoe obosnovanie tehicheskikh reshenij sozdaniya i sovershenstvovaniya prirodohrannogo oborudovaniya dlja vodnogo transporta i predpriyatij rechnogo flota [Scientific substantiation of technical solutions for the creation and improvement of environmental protection equipment for water transport and river fleet enterprises]: monografiya, N.Novgorod: izd-vo FBOU VPO VGAVT, 2017., 436 s.
5. Rozhdestvenskiy V.V. Kavitacija [Cavitation] L.: Sudostroenie, 1977., 248 s.
6. Ivanov L.A. O primenenii kavitatorov (obzornaya stat'ja) [On the use of cavitators (review article)], Jenergosbereazhenie: Jenergosbereazhushhie tehnologii dlja promyshlennyh predpriyatij. Miass, 2008. S. 28-38.
7. Ocenka jeffektivnosti novykh tehicheskikh reshenij po jekonomii toplivnyh resursov na rechnykh sudah: otchet po NIR № 944607 [Evaluation of the effectiveness of new technical solutions for saving fuel resources on river vessels: research report № 944607], N. Novgorod: FGOU VPO «VGAVT», 1994., 113 s.
8. Kurnikov A.S. Sozdanie matematicheskikh modelej sistem obespecheniya obitaemosti sudov: monografiya [Creation of mathematical models of ship habitability systems: monograph], N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2002., 156 s.
9. Alekseev S.E. Ozonirovanie v tehnologii ochistki stochnykh vod [Ozonation in wastewater treatment technology], Ozon i drugie chistye oksiditeli. Nauka i tehnologii: Materialy 23-go Vserossiyskogo seminar, Pod red. V.V. Lunina, V.G. Samojlovicha i S.N. Tkachenko, M., MGU, 2002., S.38.
10. Flinn G. Fizika akusticheskoy kavitacii v zhidkostyah [Physics of acoustic cavitation in liquids], Fizicheskaja akustika, pod red. U. Mezona, T. 1, M.: Mir, 1967, 428 s.
11. Sirotnuk M.G. Akusticheskaja kavitacija [Acoustic cavitation]; otv. red. V.A. Akulichev, L.R. Gavrilov, Tihookean. okeanol. in-t im. V.I. Il'icheva DVO RAN. M.: Nauka, 2008., 271 s.
12. Promtov M.A. Kavitacija [Cavitation], Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehicheskogo universiteta Tambov: Izd-vo FBOU VPO «TGTU», 2011., № 4. S. 28-36.
13. Xaritonov Yu.Ya. Analiticheskaya ximiya: uchebnyk dlya studentov VUZov obuchayushix po farmacevticheskim i ne ximicheskim special'nostyam [Analytical Chemistry: a textbook for university students studying pharmaceutical and non-chemical specialties] 2-e izd., M. Vy'sshaya shkola, 2001, 559 s.
14. Patent № 2705355 Rossiyskaya Federaciya [Russian Federation], MПК C02F 9/06(2006.01), C02F 1/78(2006.01), C02F 1/46(2006.01), C02F 1/32(2006.01), B01D 36/00(2006.01). Ustrojstvo ochistki i prigotovleniya pitevoj vody [Device for treatment and preparing drinking water]: № 2705355 decl. 23.04.2019 : publ. 06.11.2019/ Mizgirev D.S., Gurianov N.M.; declarant Gurianov Nikolay Mihaylovich. 10 s.: il.
15. Mizgirev, D. S. Analiz texnicheskix reshenij sudovy sistem pitevoj vody, [Analysis of technical solutions of marine drinking water systems] Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2020., № 63.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мизгирев Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Dmitriy S. Mizgirev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Сугаков Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: sugakov_vg@mail.ru

Гурьянов Николай Михайлович, аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gurnikol@yandex.ru

Valerii G. Sugakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical equipment of water transport facilities, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: sugakov_vg@mail.ru

Nikolay M. Guryanov, graduate student of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: gurnikol@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024.

Научная статья

УДК 629.12.002.8

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.058>

Интегральная оценка уровня экологической безопасности судна на этапах жизненного цикла

Наумов В.С.¹ nauvs@mail.ru, Кочнева И.Б.¹ iringre@mail.ru, Отделкин Н.С.¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. На каждом этапе жизненного цикла судна – проектировании, строительстве, эксплуатации, утилизации – происходит его взаимодействие с окружающей средой, которое в ряде случаев имеет негативные последствия той или иной интенсивности. Для каждого этапа жизненного цикла судна приведены основные элементы деятельности, в результате реализации которых и формируются экологические аспекты. Оценка интенсивности негативного воздействия на окружающую среду может быть выполнена комплексным коэффициентом экологической безопасности судна, отражающим уровень воздействия элементов деятельности объекта на окружающую среду. В статье разработана структура данного коэффициента, его основные составляющие и общие подходы к оценке. Итогом применения предлагаемого коэффициента может стать цветовая маркировка судна. Представляемая маркировка экологической безопасности судна позволит идентифицировать суда, отвечающие критериям экологической предпочтительности, и будет инструментом, который трансформирует усилия в области решения проблем негативного воздействия судна на окружающую среду в конкурентные преимущества при рыночном продвижении продукции.

Ключевые слова: экологическая безопасность, воздействие на окружающую среду, жизненный цикл, экологические аспекты, судно, экологическая маркировка, жизненный цикл, критерии экологической безопасности

Для цитирования: Наумов В.С., Кочнева И.Б., Отделкин Н.С. Интегральная оценка уровня экологической безопасности судна на этапах жизненного цикла, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 48—52. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.058

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.058>

Integrated assessment of the level of environmental safety of the ship at the stages of the life cycle

Victor S. Naumov¹ nauvs@mail.ru, Irina B. Kochneva¹ iringre@mail.ru, Nikolay S. Otdelkin¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru¹Volga State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. At each stage of the ship's life cycle – design, construction, operation, disposal – its interaction with the environment occurs, which in some cases has negative consequences of varying intensity. For each stage of the ship's life cycle, the main elements of activity are given, as a result of which environmental aspects are formed. The assessment of the intensity of the negative impact on the environment can be carried out by a complex coefficient of environmental safety of the ship, reflecting the level of impact of the elements of the facility's activities on the environment. The article develops the structure of this coefficient, its main components and general approaches to evaluation. The result of the application of the proposed coefficient may be the color marking of the ship. The presented marking of the environmental safety of the ship will allow identifying ships that meet the criteria of environmental preference, and will be a tool that transforms efforts in solving problems of the negative impact of the ship on the environment into competitive advantages in the market promotion of products.

Keywords: environmental safety, environmental impact, life cycle, environmental aspects, ship, environmental labeling, life cycle, environmental safety criteria

For citation: Victor S. Naumov, Irina B. Kochneva, Nikolay S. Otdelkin Integrated assessment of the level of environmental safety of the ship at the stages of the life cycle, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 48—52. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.058

Введение

Для обеспечения охраны окружающей среды, суда должны отвечать требованиям экологической безопасности, которые изложены в экологическом законодательстве [1]. Так в проект судна закладываются минимальные требования по судовой защите окружающей среды в период эксплуатации от нефтесодержащих вод, сточных вод, мусора, выбросов атмосферы от судовой энергетической установки [2], [3], [4]. При постройке, ремонте, модернизации, утилизации судна

судостроительными, судоремонтными предприятиями организуется выполнение нормативных показателей экологичности – предельно допустимых выбросов в атмосферу, предельно допустимых сбросов в гидросферу, нормативов образования и лимитов размещения отходов, допустимых уровней физических воздействий.

Поддержание нормативных уровней воздействия на окружающую среду является важной задачей для хозяйствующих объектов и предметом экологического управления. При решении данных

задач необходимо определять уровень экологической опасности. За показатели экологической безопасности в системах управления принимают, например, степень экологичности производства, продукции, коэффициент экологической эффективности, ресурсоемкость и ресурсный баланс предприятия, оценки вероятности аварий, эколого-экономические показатели [5], [6], [7].

Так же широко применяется интегральная оценка. Например, для оценки состояния территорий используются комплексный индекс загрязнения атмосферы, интегральные коэффициенты сохранности биоразнообразия, суммарный показатель антропогенной нагрузки [8]. Для оценки экологической безопасности предприятия применяют обобщенный показатель экологической опасности предприятия [9].

Судно на всех этапах жизненного цикла оказывает негативное воздействие на окружающую среду, поэтому авторы считают целесообразным ввести комплексный коэффициент экологической безопасности судна (далее – КЭБС). Данный коэффициент будет оценивать уровень экологической безопасности судна на протяжении всего жизненного цикла, исходя из его воздействия на окружающую среду, уровня принимаемых мер для обеспечения экологической безопасности. Предполагаем, что значение коэффициента для конкретного судна может изменяться.

Оценка экологической безопасности судна на этапах жизненного цикла

Оценку экологической безопасности судна на этапах жизненного цикла можно выполнить с помощью КЭБС, который представляет собой результат интегральной оценки:

$$K = \sum_{i=1}^4 a_i K_i, \quad (1)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты экологической безопасности судна соответственно на этапах проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации; a_i – весовой коэффициент экологической значимости соответствующего этапа жизненного цикла судна.

Коэффициент экологической безопасности соответствующего этапа жизненного цикла судна (K_i) представляет собой совокупность баллов по элементам деятельности судна, которые укрупнено включают [10], [11], [12]:

- 1) на этапе жизненного цикла «Проектирование»
 - экологические решения на этапе эскизного проектирования;
 - экологические решения на этапе технического проекта и т.д.;
- 2) на этапе жизненного цикла «Строительство»
 - корпусное производство (резка, сварка, грунтовка, сушка);
 - механомонтажное производство (резка, сварка, грунтовка, окраска, сушка);

- достроечное производство (сушка, распиловка, станочная обработка древесины, подготовка поверхностей под окраску, окраска, сушка, раскрой, монтаж изоляционных материалов) и т.д.;

3) на этапе жизненного цикла «Эксплуатация»

- техническое обслуживание;
- работа СЭУ;
- погрузочно-разгрузочные работы;
- жизнедеятельность пассажиров и экипажа;
- смена листов обшивки;
- правка обшивки вмятины с заменой и правкой набора;

4) на этапе жизненного цикла «Утилизация»

- осушка, зачистка судовых систем, грузовых трюмов;
- демонтаж оборудования, систем, устройств,стройки помещений, изоляции;
- разделька оборудования, систем, корпуса и т.д.

Тогда коэффициент K_i можно представить в следующем виде:

$$K_i = \sum_{j=1}^n b_j \zeta_j, \quad (2)$$

где b_j – количество баллов элемента деятельности на соответствующем этапе жизненного цикла; ζ_j – булевой коэффициент, равный 1 при наличии элемента деятельности 0 – при его отсутствии на конкретном судне.

Последний определяется исходя из этапа жизненного цикла судна и его хозяйственной задачи. Так, например, на этапе строительства судна резке металла будет присваиваться значение булевого коэффициента равное 1 при строительстве с использованием металла, а при строительстве судов из пластика данный элемент деятельности будет отсутствовать и булевой параметр равен 0.

Поскольку КЭБС рассчитывается для судов допущенных к эксплуатации и он не является оценкой допуска судов в рейс, его целесообразно ранжировать по нескольким уровням, исходя из условия:

$$K \leq Z_m, \text{ при } m=1, 2, \quad (3)$$

где Z_1 – пороговое значение низкого уровня экологической опасности; Z_2 – пороговое значение высокого уровня экологической опасности.

Тогда получим, что при $K < Z_1$ – низкий уровень экологической безопасности; $Z_1 \leq K \leq Z_2$ – средний; $K > Z_2$ – высокий уровень.

Для удобства визуализации и идентификации конкретного судна, систематизации элементов деятельности по этапам жизненного цикла судна, предлагается цветовая маркировка уровня экологической безопасности судна, приведенная на рис. 1.

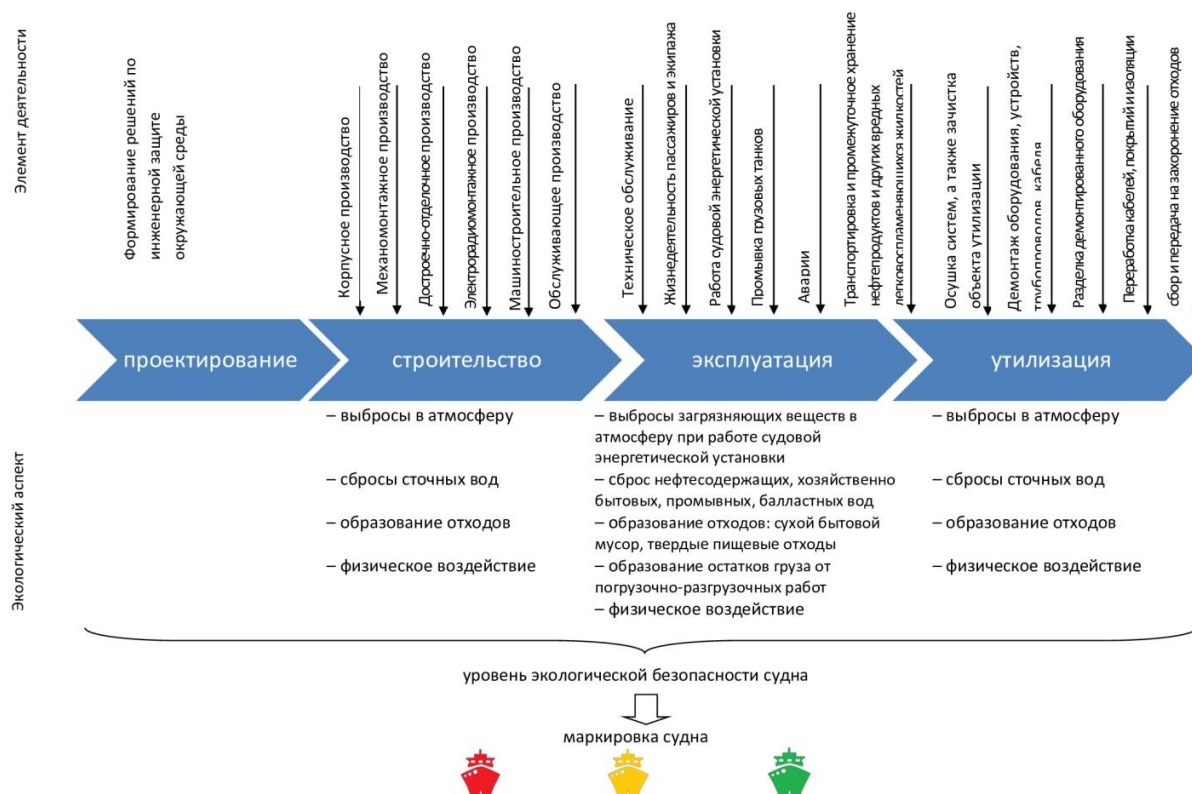


Рис. 1. Структура оценки экологической безопасности судна

Заключение

Оценка экологической безопасности судна необходима для решения вопросов управления экологической безопасностью.

Оценку экологической безопасности разрозненно проводят на отдельных этапах жизненного цикла, определяя, например, экологические риски при наступлении определенных негативных событий; экологическую эффективность; критерии экологичности производства. При этом нет единой оценки экологической безопасности на всех этапах жизненного цикла судна.

Предлагаемый КЭБС является интегральным показателем, позволяющим комплексно оценить экологическую безопасность судна, учитывая множество элементов деятельности судна на протяжении жизненного цикла.

Для использования КЭБС требуется оценка нормирующих коэффициентов, разработка матрицы элементов деятельности и оценка величины баллов при каждом действии на этапах жизненного цикла. Итоговой задачей должен быть анализ пороговых значений, который позволит однозначно классифицировать суда по уровню экологической безопасности в процессе жизненного цикла.

Разработка КЭБС позволит определить уровень экологической безопасности судна с учетом деятельности на этапах жизненного цикла, провести типологию судов, оценить инвестиционную привлекательность и потенциал судна. Комплексная оценка уровня экологической безопасности судна может быть основой для разработки стратегического плана обеспечения экологической безопасности судоходства, а также диверсифицировать налоговую базу для экологически ответственного бизнеса.

Литература

1. Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ (ред. от 03.08.2018) «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ.
2. Постановление Правительства РФ от 12.08.2010 N 623 (ред. от 06.08.2020) "Об утверждении технического регламента о безопасности объектов внутреннего водного транспорта" // Собрание законодательства РФ.
3. ФАУ «Российское Классификационное Общество». Правила классификации и постройки судов. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS-RKO.pdf?t=1703756036> (дата обращения 23.10.2024).
4. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules>. (дата обращения 23.10.2024).
5. Глушенко Марина Евгеньевна Экологическая безопасность предприятия: комплексная методика оценки // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2015. №4 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-bezopasnost-predpriyatiya-kompleksnaya-metodika-otsenki> (дата обращения: 19.10.2024).
6. Студнев, С. В. Обоснование выбора технологии разделки судов на лом с учетом экономических критериев и существующих экологических ограничений [Текст] / С. В. Студнев, Е. Г. Бурмистров, Т. А. Михеева // Вестник / ВГАБТ. - Н.Новгород, 2015. - Вып. 44. - С. 192-199.

7. Соловьев А. В. Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания / А. В. Соловьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 306–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322.
8. Ханова, С. А. Особенности исследования загрязнения атмосферного воздуха в городах / С. А. Ханова, Т. А. Воробьева // Естественные и технические науки. — 2018. — № 9(123). — С. 74-76. — EDN YLEYJF.
9. Никитенко, Ю. В. Критерии и показатели оценки экологической безопасности предприятия / Ю. В. Никитенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. — 2014. — № 12. — С. 62-66. — EDN SGLYOL.
10. Наумов, В. С., & Кочнева, И. Б. (2022). Совершенствование экологической маркировки судов. Научные проблемы водного транспорта, (71), 268-276. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.269>
11. Наумов, В. С. Анализ экологических аспектов жизненного цикла судна / В. С. Наумов, И.Б. Кочнева // Речной транспорт (XXI век). — 2023. — № 2(106). — С. 48-50.
12. Наумов, В. С. Анализ экологических аспектов эксплуатации судов в навигационный период / В. С. Наумов, И. Б. Кочнева // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 72. — С. 267-273. — DOI 10.37890/jwt.vi72.302. — EDN YSNRIP.

References

1. Federal'nyy zakon ot 21.11.2011 № 323-FZ (red. ot 03.08.2018) «Ob osnovakh okhrany zdorov'ya grazhdan v Rossiyskoy Federatsii» [On the basics of public health protection in the Russian Federation] // Sobranie zakonodatel'stva RF.
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 12.08.2010 N 623 (red. ot 06.08.2020) "Ob utverzhdenii tekhnicheskogo reglamenta o bezopasnosti ob"ektov vnutrennego vodnogo transporta" [On approval of the technical regulations on the safety of inland waterway transport facilities] // Sobranie zakonodatel'stva RF.
3. FAU «Rossiyskoe Klassifikatsionnoe Obshchestvo». Pravila klassifikatsii i postroyki sudov [Rules for the classification and construction of ships]. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS-RKO.pdf?t=1703756036> (data obrashcheniya 23.10.2024).
4. FAU «Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva». Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of marine vessels]. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules>. (data obrashcheniya 23.10.2024).
5. Glushchenko Marina Evgen'evna Ekologicheskaya bezopasnost' predpriyatiya: kompleksnaya metodika otsenki [Environmental safety of the enterprise: a comprehensive assessment methodology] // Nauka o cheloveke: gumanitarnye issledovaniya. 2015. №4 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskaya-bezopasnost-predpriyatiya-kompleksnaya-metodika-otsenki> (data obrashcheniya: 19.10.2024).
6. Studnev, S. V. Obosnovanie vybora tekhnologii razdelki sudov na lom s uchetoм ekonomicheskikh kriteriev i sushchestvuyushchikh ekologicheskikh ogranicheniy [Justification of the choice of technology for cutting ships for scrap, taking into account economic criteria and existing environmental restrictions] [Tekst] / S. V. Studnev, E. G. Burmistrov, T. A. Mikheeva // Vestnik / V GAVT. - N.Novgorod, 2015. - Vyp. 44. - S. 192-199.
7. Solov'ev A. V. Metodika otsenki ekologicheskoy effektivnosti sudov vnutrennego plavaniya [Methodology for assessing the environmental efficiency of inland navigation ships] / A. V. Solov'ev // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 306–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322.
8. Khanova, S. A. Osobennosti issledovaniya zagryazneniya atmosfernogo vozdukha v gorodakh [Features of the study of atmospheric air pollution in cities] / S. A. Khanova, T. A. Vorob'eva // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. — 2018. — № 9(123). — С. 74-76. — EDN YLEYJF.
9. Nikitenko, Yu. V. Kriterii i pokazateli otsenki ekologicheskoy bezopasnosti predpriyatiya [Criteria and indicators for assessing the environmental safety of the enterprise] / Yu. V. Nikitenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. — 2014. — № 12. — С. 62-66. — EDN SGLYOL.
10. Naumov, V. S., & Kochneva, I. B. (2022). Sovershenstvovanie ekologicheskoy markirovki sudov [Improving the environmental labeling of ships]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, (71), 268-276. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.269>
11. Naumov, V. S. Analiz ekologicheskikh aspektov zhiznennogo tsikla sudna [Analysis of the environmental aspects of the ship's life cycle] / V. S. Naumov, I.B. Kochneva // Rechnoy transport (XXI vek). — 2023. — № 2(106). — С. 48-50.
12. Naumov, V. S. Analiz ekologicheskikh aspektov ekspluatatsii sudov v navigatsionnyy period [Analysis of environmental aspects of ship operation during the navigation period] / V. S. Naumov, I. B. Kochneva // Nauchnye problemy vodnogo transporta. — 2022. — № 72. — С. 267-273. — DOI 10.37890/jwt.vi72.302. — EDN YSNRIP.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наумов Виктор Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nauvs@mail.ru

Кочнева Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru

Отделкин Николай Станиславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». 603950, Российская Федерация, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Victor S. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: nauvs@mail.ru

Irina B. Kochneva, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: iringre@mail.ru

Nikolay S. Otdelkin - Dr. Sci. (Eng), professor, head of the department Volzhsky State University of Water Transport. Nesterova Str., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 17.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 24.11.2024.

Научная статья

УДК 629.12.002

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.059>

К вопросу об импортозамещении основного технологического оборудования для сборочно-сварочного производства российских верфей

Щеголева О.А.¹ shh151@mail.ru, Бурмистров Е.Г.² burmistrov_e_g@mail.ru, Плющаев В.И.² vip@vgavt-nn.ru, Федосенко Ю.С.² fds1707@mail.ru

¹Самарский филиал Волжского государственного университета водного транспорта, ² Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье обосновывается возможность импортозамещения основного технологического оборудования в сборочно-сварочных цехах отечественных судостроительных верфей. Отмечается, что в «нулевых» годах XXI века на ряде российских верфей были внедрены комплексно-механизированные поточные линии зарубежных производителей, однако, опыт их эксплуатации показал, что они оказываются малоэффективными в условиях мелкосерийного производства. Главная причина – их недостаточная загрузка. Указывается, что альтернативу таким линиям могут составить многофункциональные комплексно-механизированные и автоматизированные сборочно-сварочные манипуляторы, представляющие собой гибкий производственный модуль, оснащённый сборочно-сварочным порталом и комплектом сменного навесного сборочного и сварочного оборудования. Такой манипулятор уже на данном этапе развития производства позволит повысить его гибкость за счёт быстрой перенастраиваемости на выпуск изделий новой номенклатуры, сократить производственный цикл их изготовления и уменьшить производственную себестоимость, а оснащение манипулятора системой управления, функционирующей на принципах «Индустрия 4.0» позволит в краткосрочной перспективе создать полноценный отечественный промышленный робот для выполнения специфических судостроительных сборочно-сварочных работ. С учётом этого рассмотрены факторы, оказывающие влияние на выбор конструктивной схемы манипулятора и его исполнительных механизмов и определены требования к его конструктивной схеме исходя из условия его вписывания в любую возможную схему организации производственного процесса. Предполагается, что сформулированные в статье рабочие гипотезы функционирования такого манипулятора, выполненный анализ состава технологических операций для автоматизированного изготовления изделий и состава исполнительных механизмов манипулятора создают необходимую теоретическую основу для рабочего проектирования такого оборудования.

Ключевые слова: сборочно-сварочный манипулятор, многофункциональность, конструктивная схема, система управления, «Индустрия 4.0», технологическое оборудование.

Благодарности: авторы выражают благодарность Главному технологу ПАО «Завод «Красное Сормово» Алексею Николаевичу Ботманову за предоставление данных.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «ВСПП» в рамках технологического сопровождения строительства судна пр. RVP8714 (договор №RVP8714/015/2022).

Для цитирования: Щеголева О.А., Бурмистров Е.Г., Плющаев В.И., Федосенко Ю.С. К вопросу импортозамещения основного технологического оборудования в сборочно-сварочном производстве отечественных верфей, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 53–63. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.059

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.059>

On the issue of import substitution of basic technological equipment for assembly and welding production at Russian shipyards

Olga A. Shchegoleva¹ shh151@mail.ru, Evgeniy G. Burmistrov² burmistrov_e_g@mail.ru, Valery I. Plushaev² vip@vgavt-nn.ru, Yuri S. Fedosenko² fds1707@mail.ru

¹Samara branch of the Volga State University of Water Transport, ²Volga State University of Water Transport

Abstract. The article substantiates the possibility of import substitution of the main technological equipment in assembly and welding shops of domestic shipyards. It is noted that in the "zero" years of the 21st century, a number of Russian shipyards introduced complex-mechanized flow lines of foreign manufacturers, however, the experience of their operation has shown that they are ineffective in small-scale production. The main reason is their insufficient load. It is indicated that an alternative to such lines can be multifunctional complex-mechanized and automated assembly and welding manipulators, which are a flexible production module equipped with an assembly and welding portal and a set of interchangeable-mounted assembly and welding equipment. Such a manipulator already at this stage of production development will increase its flexibility due to rapid readjustment to the release of new product ranges, reduce the production cycle of their manufacture and reduce production costs, and equipping the manipulator with a control system operating on the principles of "Industry 4.0" will allow in the short term to create a full-fledged domestic industrial robot for performing specific shipbuilding assembly and welding works. Taking this into account, the factors influencing the choice of the design scheme of the manipulator and its actuators are considered and the requirements for its design scheme are determined based on the condition of its inclusion in any possible scheme of the organization

of the production process. It is assumed that the working hypotheses of the functioning of such a manipulator formulated in the article, the performed analysis of the composition of technological operations for the automated manufacture of products and the composition of the actuators of the manipulator create the necessary theoretical basis for the working design of such equipment.

Keywords: assembly and welding manipulator, multifunctionality, design scheme, control system, Industry 4.0, process equipment.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the Chief Technologist of PJSC Krasnoye Sormovo Plant Alexey Nikolaevich Botmanov for providing the data.

Financial Support: The study was carried out with the financial support of JSC VSRP within the framework of project No. RVP8714/015/202

For citation: Olga A. Shchegoleva, Evgeniy G. Burmistrov, Valery I. Plushaev, Yuri S. Fedosenko On the issue of import substitution of basic technological equipment for assembly and welding production at Russian shipyards. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 53—63. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.059

Введение

За последние 15...20 лет в сборочно-сварочных цехах (ССЦ) ряда отечественных верфей были внедрены зарубежные механизированные поточные линии для изготовления секций [1, 2]. Накопленный опыт создания и внедрения в производство таких линий показывает, что они экономически эффективны лишь при загрузке не менее 70%. Полностью использовать потенциальные возможности применённых в них высокопроизводительных и весьма дорогостоящих агрегатов оказывается практически невозможно, что связано с большим разнообразием собираемых корпусных конструкций. Как следствие, при смене номенклатуры изготавливаемых сборочных единиц (СЕ) имеют место значительные потери времени, которые тем больше, чем производительнее и дороже применяемые агрегаты, чем больше их габариты и необходимые для их размещения площади.

Поэтому целью данного исследования является обоснование возможности повышения уже в краткосрочной перспективе технического уровня и гибкости ССЦ отечественных верфей путём импортозамещения малоэффективных (из-за неполной загрузки) и дорогостоящих зарубежных линий отечественными multifunctionalными высокомеханизированными сборочно-сварочными манипуляторами (МФССМ).

Одной из задач исследования является попытка подойти к обоснованию функционала и конструктива таких манипуляторов с позиций концепции «Индустрия 4.0». Т.е., взаимосвязки в общем информационном пространстве технологического оборудования, систем управления (СУ) им, информационных систем и баз данных [2].

Такая постановка задачи базируется на идее оснащения физических объектов встроенными возможностями для взаимодействия друг с другом и с внешней средой для уменьшения или исключения участия в технологических процессах человека и возможности обработки больших объёмов информации, которые «вручную» обработать невозможно;

Сочетание этих идей делает выбранный в исследовании подход перспективным и с точки зрения цифровизации производства [3-10].

Материалы и методы

Исследование выполняется на кафедре Проектирования и технологии постройки судов ФГБОУ ВО «Волжский государственный

университет водного транспорта» и базируется на работах, начатых на кафедре ещё в 70-80-х гг. прошлого столетия под руководством проф. Ю.Г. Кулика. Уже тогда были выявлены противоречия между высокой производительностью применявшихся поточных линий и их малой загрузкой, экономической неэффективностью применения специализированных агрегатов и нерентабельностью универсального оборудования ввиду его недостаточной загрузки [3].

С начала 2020 г., в связи с запросом со стороны ряда отраслевых предприятий, исследование возобновлено на новой научной и технологической основе. Оно проводится в 3 этапа. В рамках первого авторами уже выполнен комплексный анализ проблемы повышения гибкости ССЦ верфей. Некоторые промежуточные результаты этого этапа опубликованы в работах [1, 11-13]. Второй этап предполагает разработку компоновочной схемы МФССМ. Третий – теоретическое обоснование и разработку модели обеспечения гибкости ССЦ с применением МФССМ при мелко- и среднесерийном типе производства и её экспериментальную проверку.

Исследования на всех этапах проводятся с применением апробированных методов. На первых двух этапах применяются, в основном, теоретические методы, на третьем – предполагается использование компьютерных и физических экспериментов с помощью специально разработанной действующей модели МФССМ. Основные аналитические зависимости предполагается получать с применением методов математического анализа, теории планирования эксперимента, элементов теории адаптивного управления, математического моделирования динамических процессов.

Факторы, оказывающие влияние на функционирование МФССМ

При разработке конструктивных схем МФССМ и их исполнительных механизмов (ИМ) рассматривается совокупность факторов, оказывающих влияние на их функционирование, а именно:

1) *гибкость*. Состав и характер работ в ССЦ верфей характеризуется изменяющейся количественно и качественно программой. Изменяются и типы строящихся судов. Как следствие меняются типы изготавливаемых сборочных единиц (СЕ) [2, 5, 6]. Учитывая эти обстоятельства очевидно, что производство должно обладать большой гибкостью. Этому требованию должны

удовлетворять вновь разрабатываемые средства технологического оснащения (СТО) и технологи изготовления (СЕ);

2) *облегчение труда*. В настоящее время доля ручного труда в ССЦ составляет $\approx 60\%$. При разработке МФССМ необходимо хотя бы частично решить эту проблему;

3) *устранение неблагоприятных условий труда*. Применение МФССМ должно максимально исключать запылённость, загазованность и задымлённость от сварки, ручную работу с тяжеловесными конструкциями и т.п.;

4) *приемлемость*. На верфях применяются три основные технологические схемы организации производства. МФССМ должен функционировать при любой из них и иметь минимальную стоимость;

5) *конструктивная схема* МФССМ должна обеспечивать возможность изготовления СЕ выбранным способом наиболее простым по конструкции манипулятором;

6) *качество работы*. Применение МФССМ должно обеспечивать максимально возможную точность изготовления СЕ;

7) *производительность труда*. Применение МФССМ должно обеспечивать повышение производительности труда за счёт комплексной механизации и автоматизации максимально возможного количества операций.

Рабочие гипотезы функционирования МФССМ

Таким образом, чтобы МФССМ вписывался в любую схему организации производственного процесса и в то же время в его функционале учитывалось как можно больше перечисленных выше факторов, необходимо определить требования к разработке его возможных конструктивных схем. Очевидно, что в их число должны входить следующие [6-8]:

- конструкция МФССМ должна предусматривать несущую балку, каретку, подъёмно-опускную колонну, замковое соединение, ИМ, приводы передвижения балки, каретки, подъёма и возврата колонны, энергоподводы, пульта управления;

- колонна с ИМ должна иметь не менее 4 степеней подвижности;

- приводы передвижения несущей балки и каретки должны иметь регулируемую скорость перемещения;

- МФССМ (в т.ч. каретка и колонна) должны иметь чёткую фиксацию при остановке ($\pm 2,0$ мм);

- привод подъёма колонны должен быть жёстким;

- МФССМ должен отвечать современным требованиям технической эстетики и эргономики, антропометрическим данным человека, требованиям техники безопасности;

- варианты подвода энергоресурсов (электроэнергия, сжатый воздух, CO_2) должны предусматривать возможность энергоподвода к порталу и непосредственно к каждому ИМ;

- детали, узлы и агрегаты должны изготавливаться из доступных материалов и обладать высоким уровнем унификации и стандартизации;

- конструкция МФССМ и его составных частей должна удовлетворять требованиям последующей поэтапной модернизации;

- МФССМ должен выполнять максимальное количество технологических операций

автоматизированным способом, а в перспективе – автоматически;

- конструкция МФССМ и его ИМ должна иметь возможность оперативно перенастраиваться на изготовление различных типов СЕ и отвечать современным принципам блочно-модульной компоновки;

- МФССМ как гибкое оборудование должен оперировать с неподвижной СЕ и её элементами;

- МФССМ должен быть приспособлен для работы при разных технологических схемах организации производства: 1) – секция изготавливается на одном рабочем месте, а ИМ заменяются по ходу технологического процесса; 2) – задел секций изготавливается на одном рабочем месте, но разбивается, на элементы, например, полотнище, панель, секция. ИМ заменяются по каждому виду элементов (но реже чем по 1 варианту; 3) – секция изготавливается в потоке – МФССМ размещены по ходу технологического процесса, ИМ стабильно закреплены за ними;

- МФССМ должен работать как со стендами, оснащёнными подъёмно-опускными роlikопорами (особенно при схеме 3) [4, 5];

- места расположения ИМ МФССМ должны быть чётко определены (в контейнерах или магазинах) [4];

- МФССМ должен быть оборудован быстродействующим замковым соединением для подсоединения ИМ к подвижной колонне;

- высота подъёма колонны должна быть выбрана из условий: 1) максимальной высоты балок набора; 2) габаритов захватных механизмов; 3) безопасной работы производственных рабочих.

К вопросу о выборе и обосновании параметров МФССМ

Важным представляется и обоснование типа МФССМ. Учитывая опыт, накопленный в судостроении, целесообразно выполнить МФССМ в виде портала или полупортала, перемещающегося по рельсовым направляющим. Ввиду большей компактности полупортальное исполнение является более предпочтительным [3].

С учётом изложенного проектное представление такого МФССМ может иметь вид (рис. 1).

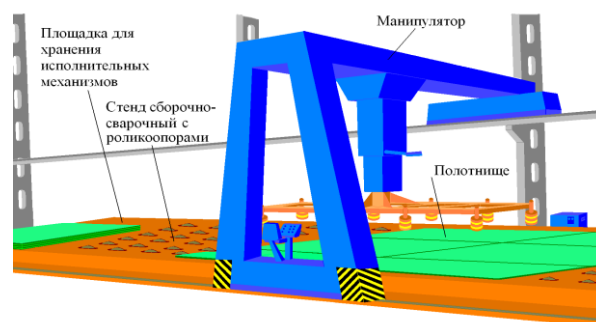


Рис. 1. Проектное представление МФССМ

Отметим отличительную особенность предлагаемого МФССМ. Все известные манипуляторы оперируют либо инструментом, либо деталью. В нашем случае МФССМ должен оперировать и ИМ (резка, сварка, зачистка) и деталями (раскладка листов, установка балок набора).

Габаритные параметры МФССМ являются определяющими как в технологическом, так и экономическом аспектах. Таковыми будем считать: длину (L), ширину (B), высоту (H) собственно манипулятора, а также зону для размещения ИМ.

На данном этапе работ параметры МФССМ могут быть определены исходя из габаритов применяющейся в ССЦ сборочно-сварочной оснастки. Поэтому его габаритная длина определится как:

$$L = L_1 + L_2 + L_3,$$

где L_1 – ширина стенда ($L_1 = 7,2$ м);

L_2 – ширина зазора между стендом и опорой МФССМ ($L_2 = 0,8$ м);

L_3 – ширина вспомогательной зоны, предназначенной для хранения деталей и сменяемого инструмента (в первом приближении $L_3 = 1,65$ м). Тогда:

$$L = 7,2 + 0,8 + 1,65 = 9,65 \text{ м.}$$

Ширину колеи рельсовых направляющих МФССМ можно принять стандартной (9,75 м).

С учётом необходимости размещения контейнеров с ИМ в зоне действия МФССМ его габаритная длина составит $\approx 10,2$ м.

При обосновании ширины МФССМ можно ориентироваться на ширину существующих агрегатов – примерно 3,0 м.

Из условий размещений СЕ и ИМ, высоту МФССМ можно принять 5,8...6,0 м.

Существующие специальные агрегаты с приведёнными выше размерами имеют массу 5...10 т.

Прикидочные расчёты показывают, что масса МФССМ (включая портал, тележку, колонну) составит ≈ 5 т. С ИМ и грузом – около 8 т.

Таким образом, с учётом приведённых обоснований и накопленного опыта применения в судостроении агрегатов того же назначения можно выйти на следующие приблизительные технические характеристики МФССМ:

Габаритные размеры, м	10,2×3,0×5,8
Масса, т	8
Скорость, м/с	
маршевая портала	0,167
маршевая тележки	0,167
подъёма колонны	0,025
Поворот колонны	360°
Скорость поворота колонны, °/с	18
Продольное перемещение, м	24
Поперечное перемещение тележки, м	8
Вертикальное перемещение колонны, м	1,3
Суммарная погрешность установочных перемещений, мм	±2
Число степеней подвижности	4

Анализ технологических процессов изготовления СЕ с точки зрения их выполнения МФССМ

Наиболее распространёнными СЕ в судостроении являются плоские секции. Вместе с

тем комплексно-механизированному и роботизированному изготовлению (в максимальном объёме) должны подвергаться все секции, в том числе лекальные и объёмные, а также крупные узлы. Изготовление корпусной конструкции типа плоской секции может производиться одним из трёх способов [1] (рис. 2).

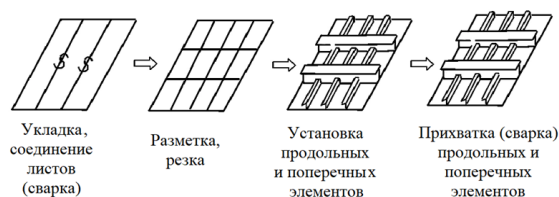
С учётом этого возможны и три технологические схемы организации производства [2, 9] (рис. 3):

- 1) на одном рабочем месте;
- 2) на одном месте с разбивкой СЕ на узлы;
- 3) на потоке – последовательное выполнение операций при перемещении изделия по позициям производственного участка.

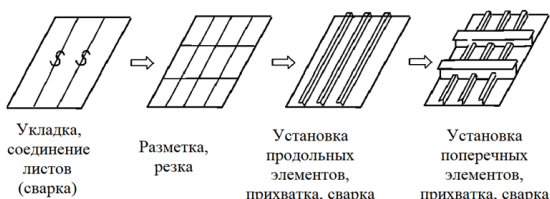
Выбор той или иной схемы зависит от программы загрузки и технической и технологической оснащённости верфи. Исходя из этого, можно рассматривать следующие два варианта изготовления СЕ:

Вариант I – СЕ изготавливается на одном рабочем месте группой специализированных агрегатов, каждый из которых предназначен для выполнения 1 или 2 операций. Однако, комплексно механизировать, а тем более автоматизировать, выполнение операций в этом случае затруднительно, так как на одном рабочем месте (позиции) сложно разместить более двух агрегатов.

Способ 1. Отдельная сборка остовов (секций)



Способ 2. Предварительная сборка продольных элементов



Способ 3. Сварка на козлах (каркасов)

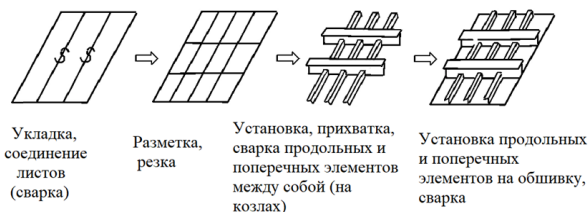


Рис. 2. Способы изготовления плоских секций

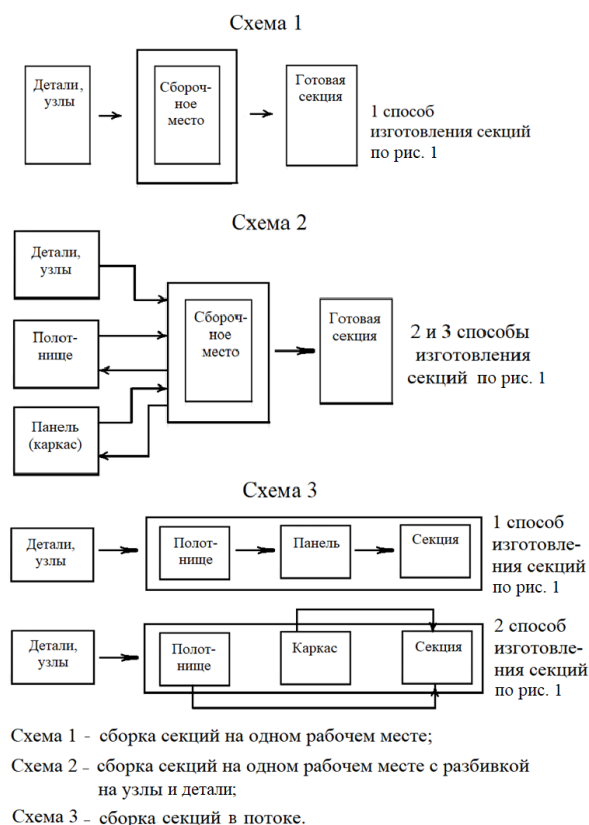


Рис. 3. Технологические схемы организации производства при изготовлении плоских секций

При изготовлении СЕ в потоке задача механизации и автоматизации решается проще, однако затруднительны загрузка агрегатов и их унификация. Затруднительна также перенастройка производства при изменениях в программе;

Вариант II – секция изготавливается на одном рабочем месте или в потоке одним базовым агрегатом (МФССМ) со сменными ИМ. При этом организация производства, как и способ изготовления СЕ, могут быть любыми. Изменение производственной программы ведёт только к изменению количества манипуляторов и их комплектации ИМ. Их загрузка может регулироваться изменением схемы организации производства и перемещением ИМ. Таким образом, достигается определённая взаимозаменяемость и универсальность средств механизации и автоматизации, как следствие, гибкость производства.

Следует заметить, что СТО для варианта I достаточно проработаны и успешно применяются

практически на многих верфях. СТО же по варианту II до настоящего времени не разрабатывались, кроме нескольких попыток их обоснования в рамках НИР (например, в работе [3]). И это несмотря на то, что в этом случае комплексная механизация и даже роботизация производства возможны при любом способе изготовления СЕ, любой схеме организации производства и любой структуре программы верфи.

Интересным в этой связи представляется рассмотрение ещё двух аспектов: 1) возможности организации работы МФССМ на принципах концепции «Индустрия 4.0» [4, 5, 10]; 2) количественного и качественного состава технологических операций при изготовлении СЕ и состава ИМ.

Цифровизация управления МФССМ в рамках концепции «Индустрия 4.0»

Что касается данного аспекта, то практическая реализация идей, заложенных в концепции «Индустрия 4.0», а именно взаимная интеграция локальных цифровых систем управления (ЛЦСУ) порталом, ИМ, сборочным стендом и оснащение их датчиками адаптации позволит ИМ «видеть» и себя и другие ИМ в едином цифровом пространстве (например, на основе систем «технического зрения»), «понимать» где и как они размещены, как они могут «взаимодействовать» друг с другом, со складами комплектации и готовой продукции, транспортной системой и т.п. [5-7]. Т.е., микропроизводственная система, обслуживаемая МФССМ, сможет при необходимости корректировать саму себя [2, 5-7]. Это повысит её гибкость, сократит производственный цикл и себестоимость изготовления СЕ [8-11].

Описанная идея может быть проиллюстрирована следующей блок-схемой (рис. 4).

Анализ технологических операций для определения количественного и качественного состава исполнительных механизмов МФССМ

Примерный состав технологических операций по изготовлению плоских секций, как наиболее распространённых СЕ корпуса судна, и их обеспечение ИМ приведён в табл. 1. При этом использованы результаты и выводы из работ [3, 12, 13].

По результатам анализа технологических операций и доступных литературных источников [14-18] выявлен количественный и качественный состав ИМ МФССМ (см. табл. 2).

Таблица 1 (начало)

Состав технологических операций по изготовлению плоских секций на МФССМ и их обеспечение ИМ

Операции техпроцесса (укрупнённые)	СТО по варианту I (поточная линия)	СТО по варианту II (МФССМ)	Специальные ИМ МФССМ, приспособления		Вид используемой энергии (привод)	Возможное совмещение функций ИМ МФССМ	
			СТО	Возможные ИМ ССМ		№ п/п И М	№ п/п совмещае- мых операций
1	2	3	4	5	6	7	8
Изготовление полотна							
1. Подъём, укладка листов (листа)	Укладчик листвого проката	МФССМ	Траверса магнитная, траверса вакуумная	-	Электрическая	1; 2	1; 2
2. Ориентация листов (листа) к базовой линии (кромке, плоскости)	Устройство ориентации, устройство транспортно е	МФССМ	Захват для полотнища и секций	Захват для секций	Пневматическа я, электрическая	2	2; 4; 7; 13; 14; 23; 24
3. Подготовка кромки листов	Резак газовый	МФССМ	Полуавтомат газорезательны й, резак	Контейнер, держатель	Тепловая	9	3; 15
4. Прижатие кромки листов	Устройство транспортно е	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Электрическая, пневматическая	2	2; 4; 7; 13; 14; 23; 24
5. Прихватка листов между собой	Инвертор сварочный	МФССМ	Сварочный полуавтомат в среде CO ₂	Держатель на колонне	CO ₂ Электрическая	8	5; 20; 27
6. Сварка стыков (стыка)	Автомат сварочный	МФССМ	Автомат сварочный	Контейнер	Электрическая	3	6; 10
7. Перемещение полуполотнища	Устройство транспортно е	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Электрическая, пневматическая	2	2; 4; 7; 13; 14; 23; 24
8. Кантование полотнища	Цеховой кран, балка кантовочная	Цеховой кран, балка кантовочна я	-	-	Электрическая	-	-
9. Подготовить сварные швы для подварки	Воздушно- дуговой строгач	МФССМ	Воздушно- дуговой строгач	Держатель	Электрическая, пневматическая	-	-
10. Подварка сварных швов	Автомат сварочный	МФССМ	Автомат сварочный	Контейнер	Электрическая	3	10; 6
11. Устранение дефектов	Сварочный инвертор, воздушно- дуговой строгач	Инвертор сварочный, строгач воздушно- дуговой	-	-	Электрическая, пневматическая	-	-
12. Съём, укладка в накопитель	Цеховой кран, балка кантовочная	Цеховой кран, балка кантовочна я	-	-	Электрическая	-	-
13. Перемещение полотнища на следующую позицию	Устройство транспортно е	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Электрическая, пневматическая	2	13; 2; 4; 7; 14; 23; 24
Изготовление панели							
14. Ориентация полотнища по базовым кромкам	Устройство ориентации, устройство транспортно е	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Электрическая, пневматическая	2	14, 2, 7, 13, 14, 23, 24
15. Резка полотнища по контур	Резак газовый	МФССМ	Полуавтомат газорезательны й, резак газовый	Контейнер, держатель	Тепловая	9	15; 3
16. Разметка мест установки набора обоих направлений	Вручную, мел, молоток, кернер	МФССМ	Устройство разметочное	Устройство разметочно е	Электрическая	444	16; 2; 17

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8
17. Зачистка мест установки и кромок набора	Вручную	МФССМ	Устройство зачистное	Устройство зачистное	Электрическая	4	17; 6
18. Установка набора главного направления	Вручную, устройство безразмерной установки набора	МФССМ	Захват-прижим для набора	Захват для набора	Пневматическая, электрическая	5 8	18; 19; 20; 25
19. Поджание набора к полотнищу Прижатие	Устройство транспортное	МФССМ	Захват для набора	Захват для набора	Пневматическая, электрическая	5 8	19; 18; 20; 25
20. Прихватка набора к полотнищу	Сварочный инвертор, сварочный полуавтомат в среде CO ₂	МФССМ	Захват для набора с полуавтоматом	Захват для набора, кронштейн	Электрическая, CO ₂	5 8	20; 19; 18; 25
21. Приварка набора к полотнищу	Агрегат для приварки набора	МФССМ	Устройство для приварки набора	Контейнер	Электрическая, CO ₂	6	21
22. Перемещение в накопитель	Цеховой кран, балка кантовочная	Цеховой кран, балка кантовочная	-	-	Электрическая	-	-
23. Перемещение панели на следующую позицию	Устройство транспортное	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Электрическая, пневматическая	2	23; 14; 13; 7; 4; 2; 24
Изготовление секций							
24. Ориентация панели	Устройство транспортное	МФССМ	Захват для секций	Захват для секций	Пневматическая, электрическая	2	24; 23; 14; 13; 7; 4; 2
25. Установка перекрёстного набора	Устройство сборочно-сварочное передвижное	МФССМ	Захват для набора (с полуавтоматом)	Захват для секций, кронштейн	Пневматическая, электрическая	5 7	25; 20; 19; 18
26. Прижатие набора	Устройство сборочно-сварочное, устройство для прижатия набора	МФССМ	Устройство для прижатия набора (высокого)	Контейнер	Пневматическая, электрическая	7 5	26; 27
27. Прихватка набора	Устройство сборочно-сварочное передвижное	МФССМ	Захват для набора (с полуавтоматом)	Кронштейн	Пневматическая	7 5	27; 26
28. Сварка набора с обшивкой и между собой	Устройство сборочно-сварочное передвижное	МФССМ	Полуавтоматы сварочные	Сварочный контейнер-держатель	Электрическая	8	28; 5; 27

Примечания:

1. Условные обозначения:  – основная функция исполнительного механизма;  – дополнительная функция ИМ;

2. Для выполнения операций 3, 5, 9, 15, 18 на колонне МФССМ должен быть предусмотрен держатель для навешивания средств механизации (ручных) – газового резака, воздушно-дугового строгача, сварочного полуавтомата.

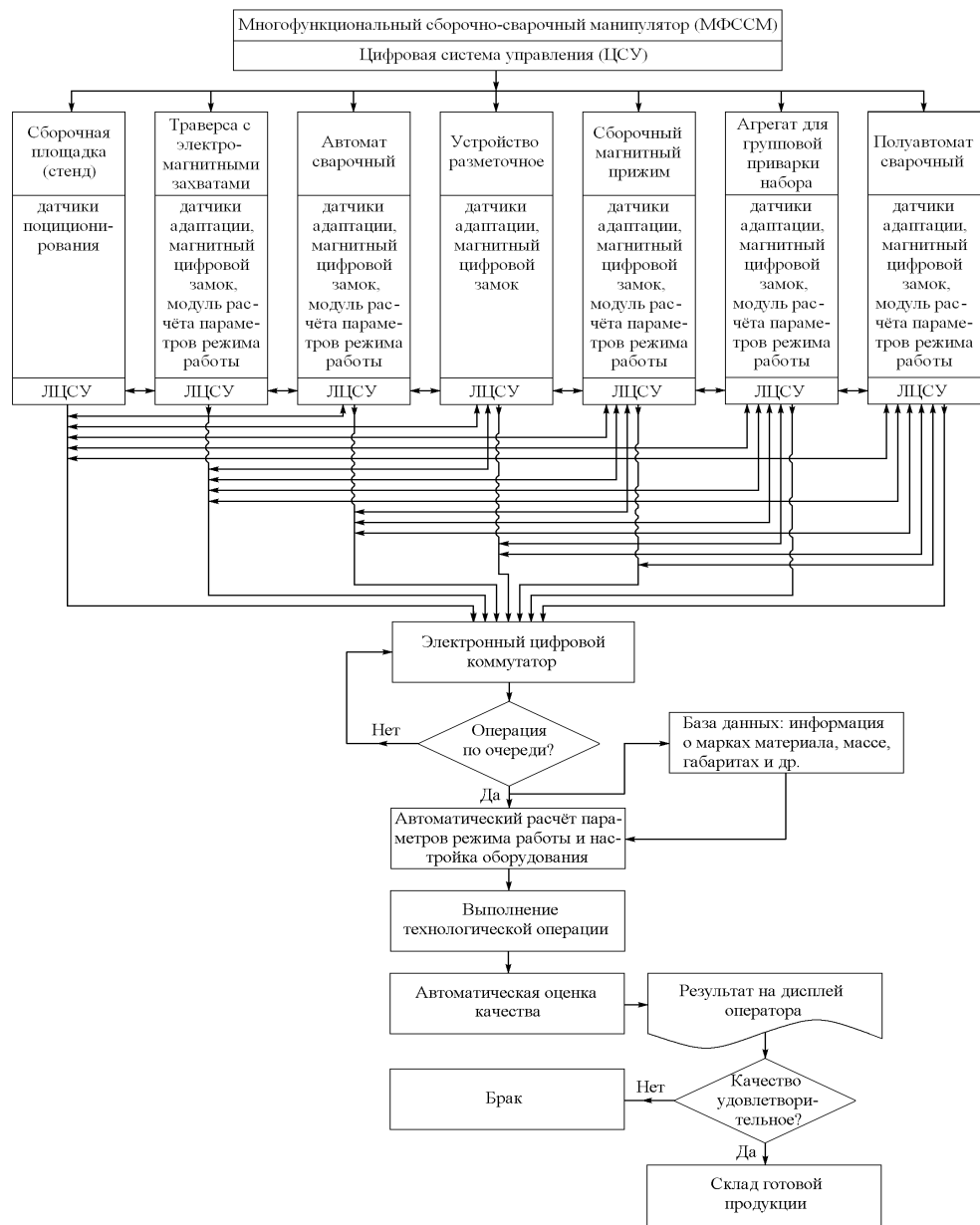


Рис. 4. Укрупнённая блок-схема взаимодействия МФССМ, сборочной площадки и ИМ в рамках цифрового управления ими

Таблица 2

Состав исполнительных механизмов МФССМ

№ п/п	Наименование исполнительного механизма	Основная функция	Дополнительная функция	Примечание
1	2	3	4	5
1	Траверса с электромагнитными захватами	Подъём и укладка листов	Ориентация листа к базовой кромке	-
1.1.	Траверса с пневмовакuumными захватами	Подъём и укладка листов	Ориентация листа к базовой кромке	-
2	Захват для полотнищ (секций)	Транспортировка полотнища (секции)	Прижатие кромок стыкуемых листов	-
2.1.	Захват для вертикальных стенок набора	Ориентация полотнища (секций) к базовой кромке, транспортировка	Прижатие низкого набора	-
3	Сварочный автомат для сварки полотнищ	Автоматическая сварка стыков полотнищ	-	-
3.1.	Сварочный автомат для сварки набора с дефектоскопом	-	Автоматическая сварка набора, контроль сварных швов в процессе сварки	Дефектоскоп смонтирован на контейнере сварочного автомата

4	Устройство разметочнозачистное	Разметка положения балок набора	Зачистка мест установки набора и кромок	Монтируется заменой диска разметочного устройства на наждачный круг
5	Захват прижим со сварочным полуавтоматом для набора	Установка набора при разметке, нажатие	Прижатие балок набора, их прихватка и полуавтоматическая сварка	Полуавтомат сварочный посредством присоединительного элемента крепится к захват-прижиму
6	Устройство для автоматической сварки набора	Автоматическая сварка набора (группа ребер)	Прихватка стыков набора, подварка дефектов	Один из держателей выполнен легкосъёмным
7	Устройство прижатия набора	Прижатие перекрёстного (высокого) набора	Транспортировка набора	Переналадка производится путём замены стоек
8	Сварочный контейнер	Сварка высокого набора и перекрытий	Прихватка приварка насыщения и т.д.	В контейнере могут размещаться от 1 до 4 сварочных полуавтоматов
9	Автомат газорезательный	Подрезка кромок, контуровка полотниц, секций	-	Возможна установка газового резака

Заключение

Выполненное исследование показывает, что комплексно-механизированные МФССМ имеют хорошие перспективы для внедрения на отечественных судостроительных верфях не только для изготовления плоских секций – наиболее распространённых СЕ судовых корпусов, – но и для изготовления секций с незначительной погибью (например, палубных) и лекальных секций в переходных районах корпусов судов. Трудоемкость изготовления последних с внедрением МФССМ может быть существенно (на 25-50%) снижена.

Кроме того, продвигаемая авторами концепция МФССМ открыта для различных усовершенствований и модернизаций, в том числе и применительно к системе управления МФССМ. За счёт этого может быть решён вопрос не только комплексной механизации изготовления СЕ, но и автоматизации (а в последующем и роботизации) процессов их изготовления.

Описываемый манипулятор уже на данном этапе развития производства позволит повысить его гибкость за счёт быстрой переналаживаемости на

выпуск изделий новой номенклатуры, сократить производственный цикл изготовления СЕ и уменьшить их производственную себестоимость. Оснащение МФССМ СУ на принципах концепции «Индустрия 4.0» позволит в краткосрочной перспективе создать полноценный отечественный промышленный робот для выполнения специфических судостроительных сборочно-сварочных работ.

С учётом изложенного, в статье рассмотрена совокупность факторов, оказывающих влияние на выбор конструктивной схемы МФССМ и его ИМ и определены требования к его конструктивной схеме исходя из условия его вписывания в любую возможную схему организации производственного процесса. Сформулированные в статье рабочие гипотезы функционирования манипулятора, выполненный анализ состава технологических операций для автоматизированного изготовления изделий и состава ИМ создают необходимую теоретическую основу для рабочего проектирования такого оборудования.

Литература

- Бурмистрова, А.Е., Щеголева О.А. Проблемы внедрения гибких производственных систем в единичном и мелкосерийном производстве и перспективы замены механизированных поточных линий многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами / Материалы МНПК для аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». 19 мая 2022 г.: Часть 1. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2022. – С. 109-119.
- Булавко, О.А. Развитие гибких производственных систем в условиях нового технологического уклада / О.А. Булавко, Л.Р. Туктарова // Бизнес. Образование. Право. – 2021. – № 2 (55). – С. 39-43. <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2021.55.207>.
- Отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка сборочно-сварочного манипулятора для изготовления корпусных конструкций в судостроении и судоремонте» (промежуточный) №865172. – Горький: ГИИВТ. – 1986. – 146 с.
- Проблемы разработки и внедрения гибких производственных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://articlekz.com/article/5590>, свободный, – Загл. с экрана. (дата обращения: 05.11.2024).
- Что такое «Индустрия 4.0»? Определение, технологии... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Электронный ресурс]. – режим доступа : <https://www.sap.com/cis/insights/what-is-industry-4-0.html>. (дата обращения: 05.11.2024).
- Цифровая система управления производством — важный шаг к «Индустрии 4.0» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Электронный ресурс]. – режим доступа : <https://controlengrussia.com/internet-veshhej/tsifrovaya-sistema-upravleniya-proizvodstvom-vazhny-j-shag-k-industrii-4-0/>, свободный, Загл. с экрана. (дата обращения: 05.11.2024).

7. Шолохов, М.А. Факторы эффективности внедрения сварочных роботов в индустрии 4.0 / М.А. Шолохов, И.В. Ершова, Д.С. Бузори́на, С.С. Полосков // Сварка и диагностика. – 2020. – № 5. – С. 41-44.
8. Белов, А.Ю. Повышение эффективности производства за счёт использования систем промышленной автоматизации / А.Ю. Белов, Д.А. Сеницын // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы / Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 2020. – С. 19-23.
9. Дуюн, И. А. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования / И.А. Дуюн, К.В. Чуев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 4. – С. 91-100. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100>.
10. Зенкевич, С.Л. Управление Роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.
11. Щеголева, О.А. Цифровизация управления технологическим оборудованием в рамках концепции «Индустрия 4.0» / Сборник материалов II-й МНПК «Актуальные решения проблем водного транспорта» (г. Астрахань), 29 мая 2023 г.
12. Бурмистров, Е.Г. Перспективы замены поточных линий в цехах верфей многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами / Е.Г. Бурмистров, О.А. Щеголева, А.Е. Бурмистрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 272-281. [Doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281).
13. Бурмистров, Е.Г. Обоснование применения на судостроительных верфях многофункциональных сборочно-сварочных манипуляторов / Е.Г. Бурмистров, О.А. Щеголева, А.Е. Бурмистрова, Т.А. Михеева // Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 73. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2023. – С. 27-36. DOI: 10.37890/jwt.vi74.343.
14. Кожевников, М.М. Синтез траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с Препятствиями / М.М. Кожевников, Э.И. Илюшин, А.В. Старовойтов, Кожевников М.М., Илюшин Э.И., А.В. Старовойтов, В.Н. Косырев // Исследования наукограда. Рубрика «Робототехника и мехатроника», 2015, № 3 (13) июль-сентябрь. – С. 36-42.
15. Механизация и автоматизация сварочного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Электронный ресурс]. – режим доступа : <https://www.uniprofit.ru/spravka/article/mechanizaciya-avtomatizaciya/> (дата обращения: 10.11.2024).
16. Choset, H. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations / H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, S. Thrun // MIT Press. Boston, 2005. – 680 p.
17. Lewis, F. L. Robot Manipulator Control: Theory and Practice / F. L. Lewis, D. M. Dawson, Ch. T. Abdallah. – NY.: Marcel Dekker, Inc., 2004. – 607 p.
18. Dutta, A. Robotic Systems – Applications, Control and Programming / A. Dutta [et al.]. – InTech, 2012. – 628 p.

References

1. Burmistrova A.E., Shchegoleva O.A. Problemy vnedreniya gibkikh proizvodstvennykh sistem v edinichnom i melkoseriynom proizvodstve i perspektivy zameny mekhanizirovannykh potochnykh liniy mnogofunktsional'nymi sborочно-svarochnymi manipulyatorami. Materialy MNPK dlya aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii». 19 maya 2022 g.: Chast' 1. SPb.: Izd-vo GUMRF im. admirala S.O. Makarova, 2022, S. 109-119.
2. Bulavko O.A. Razvitie gibkikh proizvodstvennykh sistem v usloviyakh novogo tekhnologicheskogo uklada. O.A. Bulavko, L.R. Tuktarova. Biznes. Obrazovanie. Pravo, 2021, №2(55). S. 39-43. <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2021.55.207>.
3. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Razrabotka sborочно-svarochnogo manipulyatora dlya izgotovleniya korpusnykh konstruksiy v sudostroenii i sudoremonte» (promezhutochnyy) №865172. Gor'kiy: GI-IVT. 1986. 146 s.
4. Problemy razrabotki i vnedreniya gibkikh proizvodstvennykh sistem [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: https://articlekz.com/article/5590,svobodnyy,Zagl.s_ekrana. (data obrashcheniya: 05.11.2024).
5. Chto takoe «Industriya 4.0»? Opredelenie, tekhnologii... [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [Elektronnyy resurs]. rezhim dostupa: <https://www.sap.com/cis/insights/what-is-industry-4-0.html>. (data obrashcheniya: 05.11.2024).
6. Tsifrovaya sistema upravleniya proizvodstvom — vazhnyy shag k «Industrii 4.0» [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: [Elektronnyy resurs]. – rezhim dostupa : <https://controlengrussia.com/internet-veshhej/tsifrovaya-sistema-upravleniya-proizvodstvom-vazhny-j-shag-k-industrii-4-0/>, svobodnyy, Zagl. s ekrana. (data obrashcheniya: 05.11.2024).
7. Sholokhov M.A. Faktory effektivnosti vnedreniya svarochnykh robotov v industrii 4.0. M.A. Sholokhov, I.V. Ershova, D.S. Buzorina, S.S. Poloskov. Svarka i diagnostika, 2020, №5. S. 41-44.
8. Belov, A.Yu. Povyshenie effektivnosti proizvodstva za schet ispol'zovaniya sistem promyshlennoy avtomatizatsii. A.Yu. Belov, D.A. Sinitsyn // Tekhnika i tekhnologii, politika i ekonomika: problemy i perspektivy. Materialy VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M.: FGAOU VO «Moskovskiy politekhnicheskii universitet», 2020, S. 19-23.
9. Duyun I.A. Otsenka effektivnosti raboty gibkikh proizvodstvennykh sistem i robotizirovannykh kompleksov s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya. I.A. Duyun, K.V. Chuev. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova, 2021, № 4. S. 91-100. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100>.

10. Zenkevich S.L. Upravlenie Robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami: ucheb. dlya vuzov. S.L. Zenkevich, A.S. Yushchenko. M. Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000, 400 s.
11. Shchegoleva O.A. Tsifrovizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi oborudovaniem v ramkakh kontseptsii «Industriya 4.0». Sbornik materialov II-y MNPК «Aktual'nye resheniya problem vodnogo transporta» (g. Astrakhan'), 29 maya 2023 g.
12. Burmistrov E.G. Perspektivy zameny potochnykh liniy v tsekhakh verfey mnogofunktsional'nymi sborochno-svarochnymi manipulyatorami. E.G. Burmistrov, O.A. Shchegoleva, A.E. Burmistrova. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 2023. T.15. №2. S. 272-281. Doi.org/10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281.
13. Burmistrov E.G. Obosnovanie primeneniya na sudostroitel'nykh verfyakh mnogofunktsional'nykh sborochno-svarochnykh manipulyatorov E.G. Burmistrov, O.A. Shchegoleva, A.E. Burmistrova, T.A. Mikheeva. Nauchnye problemy vodnogo transporta. Vypusk 73. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2023, S. 27-36. DOI: 10.37890/jwt.vi74.343.
14. Kozhevnikov M.M. Sintez traektoriy sborochno-svarochnykh robotov-manipulyatorov v rabochey srede s Prepyatstviyami. M.M. Kozhevnikov, E.I. Ilyushin, A.V. Starovoytov, Kozhevnikov M.M., Ilyushin E.I., A.V. Starovoytov, V.N. Kosyrev. Issledovaniya naukograda. Rubrika «Robototekhnika i mekhatronika», 2015, № 3 (13) iyul'sentyabr'. S. 36-42.
15. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya svarochnogo proizvodstva [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: [Elektronnyy resurs]. rezhim dostupa: <https://www.uniprofit.ru/spravka/article/mechanizatsiya-avtomatizatsiya/> (data obrashcheniya: 10.11.2024).
16. Choset H. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, S. Thrun. MIT Press. Boston, 2005, 680 s.
17. Lewis F.L. Robot Manipulator Control: Theory and Practice. F.L. Lewis, D.M. Dawson, Ch. T. Abdallah. Y.: Merceel Deccer, Inc., 2004, 607 s.
18. Dutta, A. Robotic Systems – Applications, Control and Programming. A. Dutta [et al.]. – InTech, 2012, 628 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ О Б АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Щеголева Ольга Анатольевна, аспирант кафедры проектирования и технологии постройки судов, Самарский филиал ФГБОУ ВО «Волжского государственного университета водного транспорта», 443036, г. Самара, ул. Неверова, 87, e-mail: shh151@mail.ru

Olga A. Shchegoleva, graduate student of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Samara Branch of the Volga State University of Water Transport, 443036, Samara, st. Neverova, 87, e-mail: shh151@mail.ru

Бурмистров Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Плющаев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vip@vgavt-nn.ru

Valery I. Plushaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: vip@vgavt-nn.ru

Федосенко Юрий Семёнович, заведующий кафедрой систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Yuri S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 14.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 27.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 10.11.2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Научная статья

УДК 62-135

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.060>

Особенности характеристик рабочего колеса турбомашин с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме турбины

Конюков В.Л.¹ seykgmtu@mail.ru, Горбенко А.Н.¹ gan0941@yandex.ru,

Плющаев В.И.² vip3345@yandex.ru, Викулов С.В.³ vikulov-51@mail.ru, Михеева Т.А.² MiheevaTA@yandex.ru

¹Керченский государственный морской технологический университет, ²Волжский государственный университет водного транспорта, ³Сибирский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В работе приведены результаты расчетно-теоретических исследований характеристик рабочего колеса турбомашин с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме турбины. Характеристики исследовались в широком диапазоне эксплуатационных режимов для различных углов установки рабочих лопаток. Получены зависимости окружного и внутреннего КПД, крутящего момента и определяющих потерь энергии от скоростной характеристики. В процессе исследований выявлено, что определяющими потерями энергии являются потери с выходной скоростью и срывные потери, зависящие от угла атаки при обтекании рабочих лопаток. Для снижения потерь с выходной скоростью необходимо увеличивать угол поворота потока при его взаимодействии с рабочими лопатками, но при этом увеличивается угол атаки. Дополнительные потери энергии создает парциальный подвод рабочего тела, что необходимо для обеспечения одновременной работы рабочего колеса в режиме турбины и в режиме компрессора. Определены оптимальные диапазоны углов установки лопаток симметричного профиля и диапазоны соответствующих скоростных характеристик.

Ключевые слова: рабочее колесо турбомашин, лопатка симметричного профиля, угол установки профиля лопатки, эксплуатационные характеристики, потери энергии

Для цитирования: Конюков В.Л., Горбенко А.Н., Плющаев В.И., Викулов С.В., Михеева Т.А. Особенности характеристик рабочего колеса турбомашин с радиальными лопатками симметричного профиля в режиме турбины, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 64—69. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.060

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.060>

Characteristics of the turbomachine impeller with radial blades of symmetrical profile in turbine mode

Viacheslav L. Konyukov¹ seykgmtu@mail.ru, Alexander N. Gorbenko¹ gan0941@yandex.ru,

Valery I. Plyushchaev² vip3345@yandex.ru, Stanislav B. Vikylov³ vikulov-51@mail.ru,

Tatiana A. Mikheeva² MiheevaTA@yandex.ru

¹Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation, ²Volga State University of Water Transport, ³Siberian State University of Water Transport

Abstract. The paper presents the results of computational and theoretical studies of the characteristics of the impeller of a turbomachine with radial blades of a symmetrical profile in turbine mode. The characteristics were studied in a wide range of operating conditions for various angles of installation of the blades. The dependences of the circumferential and internal efficiency, torque and determining energy losses on the speed characteristics are obtained. In the course of research, it was revealed that the determining energy losses are losses with output velocity and breakdown losses, depending on the angle of attack when the blades flow around. To reduce losses at the output speed, it is necessary to increase the angle of rotation of the flow when it interacts with the working blades, but at the same time the angle of attack increases. Additional energy losses are created by the partial supply of the working fluid, which is necessary to ensure simultaneous operation of the impeller in turbine mode and in compressor mode. The optimal ranges of the angles of installation of the blades of a symmetrical profile and the ranges of the corresponding speed characteristics are determined.

Keywords: impeller of a turbomachine, blade of a symmetrical profile, angle of installation of the blade profile, operational characteristics, of energy loss

For citation: Viacheslav L. Konyukov, Alexander N. Gorbenko, Valery I. Plyushchaev, Stanislav B. Vikylov, Tatiana A. Mikheeva, Characteristics of the turbomachine impeller with radial blades of symmetrical profile in turbine mode, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 64—69. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.060

Введение

В энергетическом машиностроении, в частности в судовом вспомогательном оборудовании, возникают задачи по использованию рабочего колеса турбомашин одновременно в режиме турбины для выработки механической энергии и в режиме компрессора (вентилятора) для повышения давления рабочего тела, что позволит существенно сократить массогабаритные показатели этого оборудования. Такое сочетание режимов может быть реализовано, когда одна активная зона рабочих лопаток работает в режиме турбины, а другая пассивная зона лопаток, в то же время, в режиме компрессора. При таком режиме необходимо использовать парциальный подвод рабочего тела к турбинным и компрессорным зонам рабочих лопаток. Поставленную задачу можно реализовать и при периодическом подводе рабочего тела в турбинном режиме, когда в промежутках между подводами газа рабочее колесо работает в режиме компрессора, используя накопленную им механическую энергию.

Известно, что проточная часть турбомашин формируется лопатками, профили которых имеют специальное назначение, при этом турбинные лопатки в процессе вращения ротора перемещаются выпуклой поверхностью вперед, в то время как рабочие лопатки компрессора перемещаются вогнутой поверхностью вперед. Для повышения эффективности рабочего колеса при одновременной работе в указанных режимах эксплуатации предлагается использовать рабочее колесо с радиально установленными лопатками симметричного профиля. Простейшим вариантом лопаток симметричного профиля является плоская лопатка. Плоские лопатки были использованы в 19 веке в паровой турбине Парсонса [1]. Также турбомшины с плоскими лопатками нашли применение в химической промышленности [2].

Эффективность работы турбины определяется, прежде всего, окружной работой, а компрессора, соответственно, теоретическим напором [3], [4]. И окружная работа и теоретический напор представляют удельную энергию взаимодействия рабочих лопаток с потоком газа, которая увеличивается с повышением угла поворота потока на рабочих лопатках [5, 6]. Обеспечить надлежащий поворот потока на лопатках симметричного профиля возможно при натекании газа на лопатки с большими углами атаки. При этом увеличение окружной работы сопровождается повышением срывных потерь энергии, которые растут с увеличением угла атаки [7]. При таком натекании срывные потери энергии аналогичны потерям при повороте лопаток регулируемого соплового аппарата [8]. Использование лопаток симметричного профиля ограничивает угол поворота потока, что вызывает повышенные потери энергии с выходной скоростью [6]. При парциальном подводе рабочего тела появляются дополнительные потери энергии, наибольшей составляющей которых являются потери энергии на выколачивание [9, 10]. Потери энергии на выколачивание будут иметь место и при периодическом подводе рабочего тела.

Угол установки лопаток определяет угол выхода потока из рабочего колеса, что отражается на величине окружной работы и срывных потерь энергии.

Цель работы – анализ характеристик рабочего колеса турбомшины с радиальными лопатками симметричного профиля, работающего в турбинном режиме при различных углах установки лопаток.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились расчетно-теоретическим способом. Объектом исследований являлось рабочее колесо осевого типа с радиальными лопатками симметричного профиля, использующее энергию скоростного напора. Рабочее колесо выполнено с относительно короткими лопатками: отношение среднего диаметра к длине лопатки принято равным 12. Угол установки лопаток изменялся от 45 град. до 10 град. Исследования выполнены при постоянной скорости скоростного напора, равной $c_1=296,3$ м/с и набегающей на рабочую решетку под углом $\alpha_1=90$ град. Скоростная характеристика, равная отношению окружной скорости на среднем диаметре рабочего колеса к скорости скоростного напора изменялась от 0 до 1,5. Степень парциальности была принята $\varepsilon=0,25$ и в процессе исследований не изменялась.

Окружная работа в турбинном режиме находится по выражению [3]

$$L_u = u(w_{1u} - w_{2u}), \quad (1)$$

где u - окружная скорость среднего диаметра проточной части рабочего колеса; w_{1u} - проекция относительной скорости на входе в рабочее колесо w_1 на окружное направление; w_{2u} - проекция относительной скорости на выходе из рабочего колеса w_2 на окружное направление.

Выражение в скобках уравнения (1) является алгебраической суммой, где следует учитывать знаки проекций относительных скоростей. Если направление проекции совпадает с направлением вектора u , то проекция принимается со знаком плюс, в противном случае - со знаком минус. Лопатки симметричного профиля создают межлопаточные каналы постоянной площади проходного сечения, что характерно для турбин активного типа. Для таких турбин, $w_2 = \psi w_1$, здесь ψ - коэффициент скорости рабочего аппарата. В связи с тем, что угол набегающего потока на рабочую решетку равен 90 град. будет справедливо выражение $w_{1u} = w_1 \cos \beta_1 = u_1$, здесь β_1 - угол между вектором относительной скорости w_1 и вектором u .

С учетом вышеизложенного, выражение (1) примет вид

$$L_u = u^2 \left(\psi \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} - 1 \right), \quad (2)$$

где β_2 - угол между вектором относительной скорости w_2 и вектором u .

Эффективность взаимодействия потока газа с лопатками турбины оценивается окружным коэффициентом полезного действия (КПД). В данном случае, рассматривая характеристики только рабочего колеса, в качестве располагаемой работы была принята кинетическая энергия набегающего потока $L_0 = c_1^2/2$. Здесь c_1 - абсолютная скорость потока на входе в рабочее колесо. Результаты исследований обрабатывались относительно скоростной характеристики $v = u/c_1$, которая пропорциональна окружной скорости. После

преобразований уравнение окружного КПД приняло вид

$$\eta_u = 2v^2 \left(\psi \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} - 1 \right). \quad (3)$$

Коэффициент скорости учитывает профильные и концевые потери энергии лопаточного аппарата рабочего колеса, который существенно уменьшается с увеличением угла атаки, в связи с отрывом потока от поверхности лопаток. Степанов Г.Ю. рекомендует вычислять коэффициент скорости по выражению [11]

$$\psi = \sqrt{\psi_0 - 0.0754 \cdot A - 0.345 \cdot B}, \quad (4)$$

где

$$A = \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_{1л}} \right)^2 - \left(\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \right)^2; \quad B = \left(\frac{\sin i \sin \beta_2}{\sin \beta_1 \sin \beta_{1л}} \right)^2;$$

$\psi_0=0,95$ – коэффициент скорости при безударном обтекании лопаток рабочего колеса ($i=0$); i – угол атаки при обтекании лопаток рабочего колеса ($i = \beta_{1л} - \beta_1$); $\beta_{1л}$ – входной лопаточный угол.

Угол установки лопаток рабочего колеса β_y изменялся от 45 град. до 10 град., при этом каждая характеристика рассматривалась в 5-ти вариантах: 1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.; 4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град.

Для симметричного профиля его хорда совпадает с осью симметрии, в связи с этим угол установки рабочих лопаток равен лопаточным углам на входе и на выходе $\beta_y = \beta_{1л} = \beta_{2л}$. В процессе исследований было принято $\beta_2 = \beta_{2л}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимости коэффициента скорости от скоростной характеристики для различных углов установки лопаток приведены на рис.1. Увеличение скоростной характеристики связано с повышением окружной скорости u . При этом уменьшается угол β_1 и соответственно угол атаки, что приводит к снижению срывных потерь энергии и увеличению ψ . Уменьшение угла установки лопаток при фиксированной v вызывает увеличение угла атаки и, соответственно, снижение ψ .

Зависимости окружного КПД от скоростной характеристики для различных углов установки лопаток приведены на рис.2. Из рисунка следует, что для всех рассмотренных углов установки лопаток имеет место оптимальное значение скоростной характеристики, соответствующее максимальному значению η_u . Наибольшее значение окружного КПД было получено при $\beta_y=20$ град. Для всех исследованных вариантов β_y , окружной КПД не превышал 40%.

Внешний вид зависимостей η_u от скоростной характеристики определяется соотношением профильных потерь энергии совместно с концевыми потерями, зависящими от коэффициента скорости ψ и потерями энергии с выходной скоростью из рабочего колеса. Изменение скоростной характеристики, определяющей режим работы рабочего колеса, вызывает существенное изменение потерь с выходной скоростью.

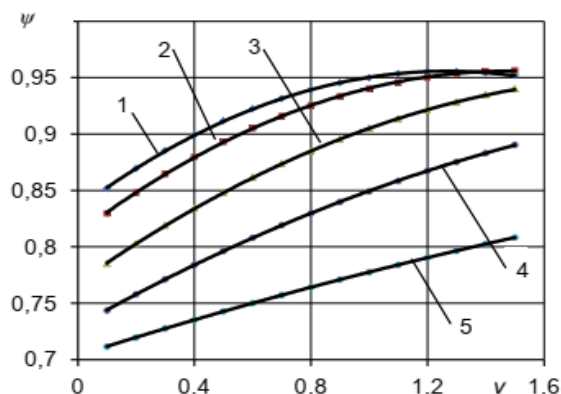


Рис. 1. Зависимости коэффициента скорости ψ от скоростной характеристики v для различных углов установки профиля:

1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.;
4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град

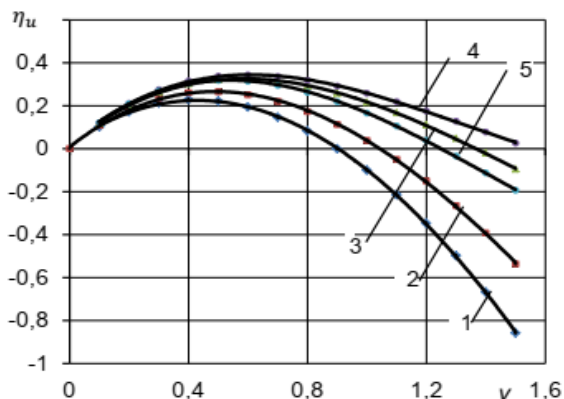


Рис. 2. – Зависимости окружного КПД η_u от скоростной характеристики v для различных углов установки профиля:

1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.;
4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град

Коэффициент потерь с выходной скоростью вычислялся по выражению, которое было получено применительно к условиям работы объекта исследований

$$\zeta_{\text{вых}} = v^2 \left(\frac{\psi^2}{\cos^2 \beta_1} - 2\psi \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} + 1 \right). \quad (5)$$

Зависимость $\zeta_{\text{вых}}$ от скоростной характеристики для различных углов установки лопаток приведены на рис.3. Уменьшение угла установки рабочих лопаток вызывает снижение потерь с выходной скоростью, что можно объяснить большим углом поворота потока при взаимодействии с лопатками. При этом минимальное значение $\zeta_{\text{вых}}$ смещается в сторону больших значений скоростных характеристик, что можно объяснить зависимостью выходной скорости от коэффициента скорости рабочего колеса ψ . Анализ зависимостей, приведенных на рис.3 показал, что как только рабочее колесо входит в компрессорный режим $\zeta_{\text{вых}}$ становится больше единицы, это значит, что в этом режиме повышается кинетическая энергия рабочего тела за счет энергии вращения рабочего колеса.

Крутящий момент рабочего колеса турбины определяет ее приемистость и склонность к саморегулированию. На рис.4 приведены зависимости относительного момента $\bar{M}$ от скоростной характеристики для различных углов установки профиля лопаток. Величина $\bar{M}$ вычислялась относительно момента оптимального режима соответствующего β_y и определялся по выражению

$$\bar{M} = \frac{\psi w_1 \cos \beta_2 - u}{\psi_0 w_{10} \cos \beta_{20} - u_0}, \quad (6)$$

где индексом «0» обозначены параметры оптимального режима, соответствующие максимальному η_u .

Из рисунков следует, что наибольший момент соответствует углу установки лопаток в диапазоне $\beta_y=(30 \div 20)$ град. При этом для всех исследованных вариантов момент страгивания, соответствующий $u=0$, более чем в два раза превышает оптимальное значение.

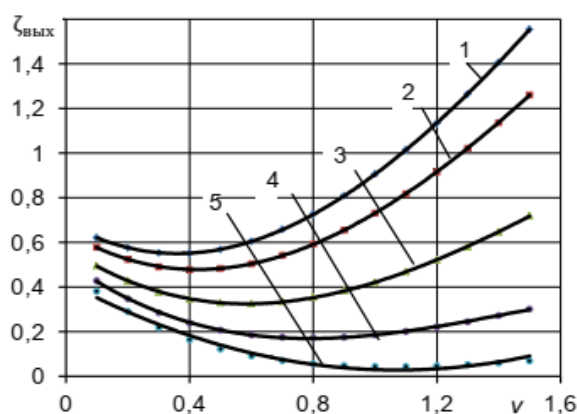


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь с выходной скоростью $\zeta_{\text{вых}}$ от скоростной характеристики v для различных углов установки профиля:

- 1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.;
4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град

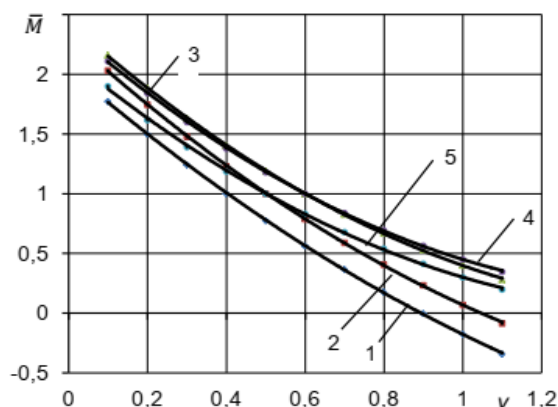


Рис. 4. Зависимость относительного момента $\bar{M}$ от скоростной характеристики v для различных углов установки профиля:

- 1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.;
4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град

Использование рабочего колеса одновременно и в режиме турбины и в режиме компрессора возможно при парциальном подводе рабочего тела. При этом возникают дополнительные потери энергии, основными из которых являются потери на выколачивание и вентиляцию. С учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей рабочего колеса коэффициент потерь от парциальности определялся по уравнению[9]

$$\zeta_\varepsilon = \frac{1}{\pi \varepsilon} \left(0,2 \frac{v^2}{\sin \beta_1} + 0,4 \frac{v}{\lambda \sin \beta_1} \right). \quad (7)$$

Внутренний КПД рабочего колеса определялся с учетом потерь энергии от парциальности, утечек через радиальный зазор и потерь от трения диска. Зависимости внутреннего КПД η_i от скоростной характеристики для различных углов установки лопаток приведены на рис. 5. Наибольшие значения внутреннего КПД соответствовали углу установки лопаток в диапазоне $\beta_y=(30 \div 20)$ град. Максимальное значение η_i не превысило 27%. При этом, оптимальное значение скоростной характеристики, вызванное внутренними потерями энергии, уменьшилось в среднем на 20%.

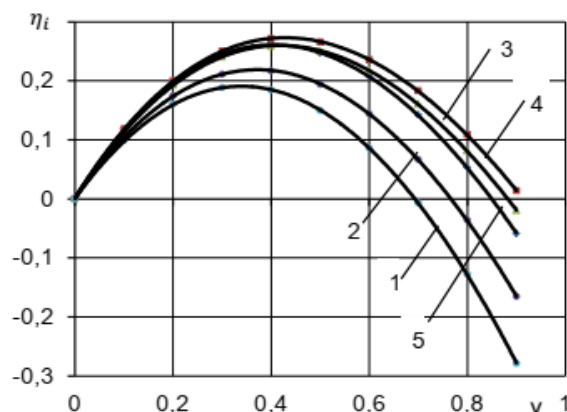


Рис. 5. Зависимости внутреннего КПД η_i от скоростной характеристики v для различных углов установки профиля:

- 1 - $\beta_y=45$ град.; 2 - $\beta_y=40$ град.; 3 - $\beta_y=30$ град.;
4 - $\beta_y=20$ град.; 5 - $\beta_y=10$ град

Заключение

Для использования одной и той же проточной части рабочего колеса в режимах турбины и компрессора целесообразно применять лопатки симметричного профиля. Расчетно-теоретические исследования показали возможность использования энергии скоростного напора рабочего тела в межлопаточных каналах такого колеса для получения механической энергии вращения. Это возможно при парциальном или периодическом подводе рабочего тела.

Исследования показали, что наибольшая экономичность рабочего колеса соответствует углу установки лопаток в диапазоне $\beta_y=(30 \div 20)$ град. Определяющее влияние на окружной КПД оказывает потеря энергии с выходной скоростью, которая резко повышается при отклонении от номинального режима работы. Для всех исследованных вариантов

угла установки лопаток β_y , окружной КПД не превышал 40%.

При парциальном подводе рабочего тела возникают дополнительные потери энергии, основными из которых являются потери на выколачивание и вентиляцию. В связи с этим, для всех исследованных вариантов β_y максимальное значение внутреннего КПД не превысило 27%.

В дальнейших исследованиях предполагается проанализировать влияние угла набегания потока на внешние характеристики рабочего колеса с лопатками симметричного профиля.

Результаты, полученные в данной статье, являются полезными и могут быть использованы при конструировании турбомашин вспомогательного назначения.

Литература

1. Паровые турбины (третий век на службе). Двигатель, 2005, № 2(38). С.12. Режим доступа: <http://engine.aviaport.ru/issues/38/page30.html>
2. Перри Дж. Справочник инженера-химика. Т.2. М., изд. «Химия», 1968, 504 с.
3. Курзон А.Г. Теория судовых паровых и газовых турбин. Л., изд. «Судостроение», 1970, 592 с.
4. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л., изд. «Машиностроение», 1972, 533 с.
5. Зайцев В.И., Грицай Л.Л., Моисеев А.А. Судовые паровые и газовые турбины. М., изд. «Транспорт», 1981., 312 с.
6. Топунов А.М. Теория судовых турбин. Л., изд. «Судостроение», 1982, 472 с.
7. Конюков В.Л., Василенко Е.Е. Анализ эксплуатационных характеристик турбинной ступени при повороте лопаток регулируемого соплового аппарата // Вестник Керченского государственного морского технологического университета, 2021, №3, С. 95-109. DOI: 10.47404/2619-0605_2021_3_95
8. Конюков В.Л. Расширение диапазона допустимых нагрузок судового четырехтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора // Научные проблемы водного транспорта, 2024, №79(2), С. 114-121. DOI: 10.37890/jwt.vi79.494
9. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. М., изд. «Энергоатомиздат», 1993, 385 с.
10. Зайцев Ю.И. Основы проектирования судовых паровых турбоагрегатов. Л., изд. «Судостроение», 1974., 437 с.
11. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М., изд. «Физматгиз», 1972, 533 с.

References

1. Parovye turbiny (tretij vek na sluzhbe) [Steam turbines (third century in service)]. Dvigatel, 2005, No. 2, issue 38. p. 12. Available at: <http://engine.aviaport.ru>
2. Perri Dzh. Spravochnik inzhenera-himika [Chemical Engineer's Handbook]. T.2. M., izd. "Himiya", 1968, 504 p.
3. Kurzon A.G. Teoriya sudovyh parovyh i gazovyh turbin [Theory of marine steam and gas turbines]. L., izd. "Sudostroenie", 1970, 592 p.
4. Kirillov I.I. Teoriya turbomashin. [Theory of turbomachines]. L., izd. "Mashinostroenie", 1972, 533 p.
5. Zajcev V.I., Gricaj L.L., Moiseev A.A. Sudovye parovye i gazovye turbiny [Marine steam and gas turbines]. M., izd. "Transport", 1981, 312 p.
6. Topunov A.M. Teoriya sudovyh turbin [Theory of marine turbines]. L., izd. «Sudostroenie», 1982, 472 s.
7. Konyukov V.L., Vasilenko E.E. Analiz ekspluatatsionnyh harakteristik turbinnoj stupeni pri povorote lopatok reguliruемого соплового аппарата [Analysis of the operational characteristics of the turbine stage when rotating the blades of the adjustable nozzle apparatus]. Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2021, №3, pp.95-109. DOI: 10.47404/2619-0605_2021_3_95
8. Konyukov V.L. Rasshirenie diapazona dopustimyh nagruzok sudovogo chetyrekhtaktnogo dizelya pri ispol'zovanii reguliruемого соплового аппарата turbokompressora [Expansion of the range of permissible loads of a marine four-stroke diesel engine using an adjustable nozzle apparatus of a turbocharger]. Nauchnye problemy vodnogo transporta, 2024, №79(2), pp. 114-121. DOI: 10.37890/jwt.vi79.494
9. Shcheglyayev A.V. Parovye turbiny. Teoriya teplovogo processa i konstrukcii turbin [Steam turbines. Theory of the thermal process and turbine design]. M., izd. "Energoatomizdat", 1993, 385 p.
10. Zajcev Yu.I. Osnovy proektirovaniya sudovyh parovyh turboagregatov [Fundamentals of the design of marine steam turbine units]. L., izd. "Sudostroenie", 1974, 437 p.
11. Stepanov G.Yu. Gidrodinamika reshetok turbomashin [Hydrodynamics of turbomachine gratings]. M., izd. "Fizmatgiz", 1972, 533 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Конюков Вячеслав Леонтьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: seykgmtu@mail.ru

Горбенко Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: gan0941@yandex.ru

Плющаев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vip3345@yandex.ru

Виколов Станислав Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, химии и инженерной графики, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: vikulov-51@mail.ru

Михеева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Viacheslav L. Konyukov, Ph. D. (Eng.), assistant professor, assistant professor of the Department of ship power plants, Kerch State Maritime Technological University, Ordzhonikidze str., 82, Republic of Crimea, Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: seykgmtu@mail.ru

Alexander N. Gorbenko, Ph. D. (Eng.), assistant professor, assistant professor of the Department of ship power plants, Kerch State Maritime Technological University, Ordzhonikidze str., 82, Republic of Crimea, Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: seykgmtu@mail.ru

Valery I. Plyushchaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vip3345@yandex.ru

Stanislav B. Vikylov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Physics, Chemistry and Engineering Graphics, Siberian State University of Water Transport 630099, Russian Federation, Novosibirsk, Shchetinkina str. 33, e-mail: vikulov-51@mail.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Ship Design and Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Статья поступила в редакцию /the article was submitted 20.10.2024.

Одобрена после рецензирования /approved after reviewing 12.11.2024.

Принята к публикации /accepted for publication 25.11.2024.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ SYSTEM ANALYSIS, INFORMATION MANAGEMENT AND PROCESSING

Научная статья

УДК 681.535:532.322:656.62

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.061>

Модельно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы поддержки принятия решений при угрозе потери поперечной остойчивости речного пассажирского судна

Бурмистров Е.Г.¹ burmistrov_e_g@mail.ru, Валяев А.В.¹ wav-dk@mail.ru, Лукина Е.А.¹ evair@yandex.ru, Федосенко Ю.С.¹ fds1707@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Рассматривается проблема обеспечения безопасности пассажиров и экипажа речного водоизмещающего судна в случае аварийного снижения запаса его поперечной остойчивости. С позиций требований к остойчивости и плавучести Правил классификации и постройки судов выполнен краткий анализ аварийности на внутренних водных путях России. Введены понятия функций интенсивности изменения первого и второго пороговых значений характеристик поперечной остойчивости судна. Разработаны модель и алгоритм оценки запаса остойчивости судна в режиме реального времени на основе сравнения взаимного расположения графиков этих функций и текущего угла крена. Разработана архитектура автоматизированной системы поддержки принятия решений капитаном при угрозе потери поперечной остойчивости. Результаты экспериментальных исследований на масштабной физической модели корпуса пассажирского водоизмещающего судна массового проекта продемонстрировали адекватность предложенной теоретической модели оценки риска потери поперечной остойчивости судна в режиме реального времени. Внедрение на речных судах автоматизированных систем предлагаемого типа будет способствовать повышению безопасности судоходства на внутренних водных путях России.

Ключевые слова: поперечная остойчивость судна, аварийная ситуация, речное водоизмещающее судно, внутренний водный транспорт, система поддержки принятия решений, безопасность судоходства, оценка риска, человеческий фактор.

Для цитирования: Бурмистров Е.Г., Валяев А.В., Лукина Е.А., Федосенко Ю.С. Модельно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы поддержки принятия решений при угрозе потери поперечной остойчивости речного пассажирского судна, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 70—78. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.061

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.061>

Model-based algorithmic support for an automated decision-making system in the event of a potential loss of lateral stability for a river passenger vessel

Evgeniy G. Burmistrov¹ burmistrov_e_g@mail.ru, Alexander V. Valyaev¹ wav-dk@mail.ru, Evgeniya A. Lukina¹ evair@yandex.ru, Yuri S. Fedosenko¹ fds1707@mail.ru,

¹Volga State University of Water Transport

Abstract. This paper addresses the issue of ensuring the safety of passengers and crew on river displacement vessels in the event of an emergency reduction in their transverse stability reserve. From the standpoint of the stability and buoyancy requirements of the Rules of Classification and Construction of Ships, a brief analysis of accidents on inland waterways in Russia is completed. The concepts of intensity functions for the change in the first and second threshold values of a vessel's transverse stability characteristics are introduced. A model and algorithm for assessing the ship's stability reserve in real-time are developed, based on comparing the mutual positioning of these functions' graphs and the current heel angle. The architecture of an automated decision support system for the captain in the event of a threat of losing transverse stability has been developed. The results of experimental studies on a scaled physical model of a mass-produced passenger displacement vessel hull demonstrated the adequacy of the proposed theoretical model for assessing the risk of losing transverse stability in real-time. The implementation of automated systems of this type on river vessels will contribute to enhancing navigational safety on inland waterways in Russia.

Keywords: ship transverse stability, emergency situation, river displacement vessel, inland water transport, decision support system, navigation safety, risk assessment, human factor.

For citation: Burmistrov E.G., Valyaev A.V., Lukina E.A., Fedosenko Yu.S. Model-algorithmic support for an automated decision support system in the event of a threat of loss of lateral stability of a river passenger vessel, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 70—78. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.061

Введение

Анализ происшествий и аварий на внутренних водных путях (ВВП) России показывает, что значительная их доля связана с негативным влиянием человеческого фактора, выражающегося в неправильных или несвоевременных действиях экипажа в экстремальных ситуациях [1]. По данным Ространснадзора, представленным в таблице 1, за 2015-2024 годы на ВВП ежегодно происходит в среднем порядка 100 транспортных происшествий, из которых 3-4% относятся к авариям с тяжкими последствиями. Наиболее критичны ошибки судоводителей пассажирских судов, поскольку, как бы хорошо не был подготовлен экипаж судна для проведения эффективной эвакуации людей в аварийной ситуации, пассажиры остаются неподготовленным потоком, управление которым, как правило, сводится к демонстрациям указателей, техники обращения с индивидуальными и коллективными спасательными средствами, объявлениям по судовой широковещательной сети [2].

Особо опасным видом аварий являются случаи потери судном поперечной остойчивости и

затопления отдельных отсеков, которые могут привести к опрокидыванию судна [3,4].

В контексте проблемы повышения безопасности плавания в работе [5] был сделан вывод о необходимости разработки и внедрения на судах автоматизированных систем поддержки принятия решений капитаном (СППР) при возникновении угрозы аварийного снижения запаса поперечной остойчивости судна.

Как очевидно, при разработке модели такой СППР недостаточно учитывать требования Российского Классификационного Общества [6], поскольку они, в частности, ограниченно нормируют случаи затопления отсеков судна. Вместе с тем, в процессе эксплуатации судна возможны ситуации, выходящие за рамки проектных расчетов [7-11]. Соответственно, возникают требующие своего решения вопросы разработки методов оценки в реальном времени судна его поперечной остойчивости.

Исследование указанных вопросов выполняется ниже в статье, целью которой является обоснование и разработка модельно-алгоритмического обеспечения СППР.

Для достижения поставленной цели решаются

Таблица 1

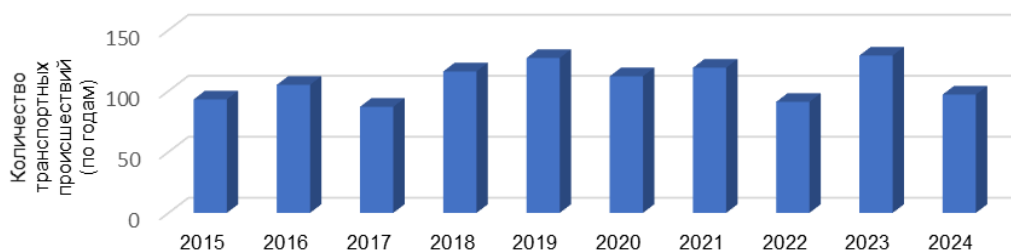


Рис. 1. Аварийность на внутренних водных путях России.

следующие задачи.

1. Определение расчетного инструмента для оценки риска потери судном поперечной остойчивости.

2. Разработка модели оценки поперечной остойчивости судна в реальном времени и алгоритма расчета пороговых значений ее характеристик.

3. Разработка архитектуры комплекса СППР и его реализация в виде программно-аппаратного прототипа.

4. Экспериментальная верификация комплекса СППР на физической модели корпуса речного пассажирского судна в опытовом бассейне.

Расчетный инструмент для оценки поперечной остойчивости в СППР

В качестве базовой платформы для мониторинга поперечной остойчивости судна в СППР используется диаграмма статической остойчивости (ДСО) [12, 13], которая рассчитывается на основе данных о текущей посадке и нагрузке судна, получаемых в режиме реального времени от системы соответствующих датчиков.

ДСО может быть представлена в виде графика зависимости восстанавливающих моментов M или их удельных величин – плеч статической остойчивости l при различных углах крена судна θ .

Далее в работе примем к рассмотрению функцию

$l(\theta)$, являющуюся согласно физическому смыслу удельным восстанавливающим моментом $l(\theta) = M(\theta)/D$, где D – весовое водоизмещение.

На рис. 1 графиком функции l представлен типичный вид ДСО для речных водоизмещающих пассажирских судов, а расположение выделенных на графике пороговых точек А, В определяется условиями (1), (2).

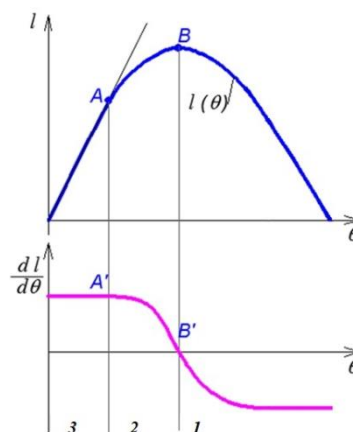


Рис. 1. ДСО и соответствие её характерных точек состояниям судна.

$$\text{if } \frac{h_{\theta_{i+1}}}{h_{\theta_i}} - 1 < 0: h_{\theta_i} \rightarrow "A", \quad (1)$$

$$\text{if } h_{\theta_{i+1}} < 0: l_i \rightarrow "B", \quad (2)$$

где $h_{\theta} = \frac{dl}{d\theta}$ – обобщенная поперечная метacentрическая высота, график зависимости которой от θ также представлена на рис. 1.

Зоны 1, 2, 3, выделенные на рис. 1, соответствуют трем качественно различным состояниям судна [14], а именно: зона 3 – опрокидывание судна невозможно; зона 2 – опрокидывание судна невозможно, но по мере роста угла крена θ риск опрокидывания судна возрастает; зона 1 – опрокидывание судна гарантировано в любой момент времени.

Для оценки риска потери поперечной остойчивости судна в момент замера угла крена достаточно с использованием актуальной ДСО определить, какой зоне соответствует состояние судна.

Аппроксимация полученных для ряда дискретных значений θ соответствующих последовательностей пороговых точек $A_1, A_2, \dots, A_n$ и $B_1, B_2, \dots, B_n$ непрерывными кривыми позволяет построить представленные на рис. 2 кривые $\alpha(\theta)$ и $\beta(\theta)$, отображающие изменения качественных характеристик остойчивости судна.

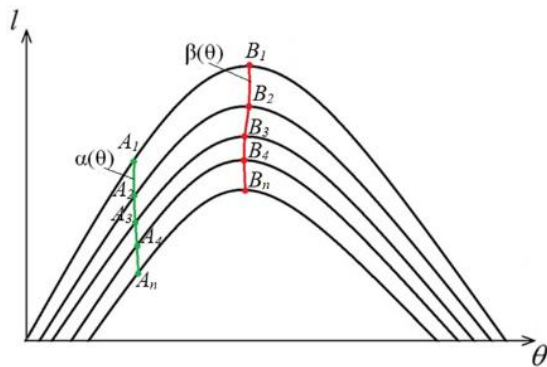


Рис. 2. Кривые изменения пороговых значений характеристик поперечной остойчивости.

Для целей СППР кривые изменения угла крена и пороговых значений характеристик поперечной остойчивости целесообразно отображать на плоскости θ, t в виде зависимостей от времени. Соответственно $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ на рис. 3 – это функции интенсивности изменения пороговых значений характеристик поперечной остойчивости судна.

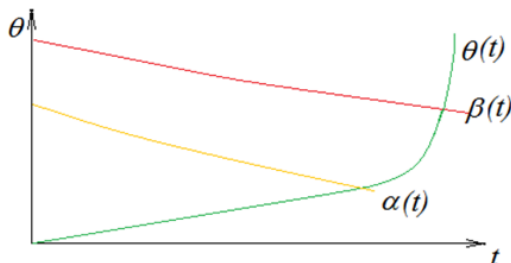


Рис. 3. Функции интенсивности изменения пороговых значений характеристик остойчивости.

Ниже по тексту $\alpha(t)$ именуется функцией интенсивности изменения первого порогового значения поперечной остойчивости судна; она

отражает снижение интенсивности возрастания плеча статической остойчивости на восходящей ветви ДСО по мере приближения к ее точке максимума.

Аналогично ниже $\beta(t)$ именуется функцией интенсивности изменения второго порогового значения поперечной остойчивости судна; она отражает достижение точки неустойчивого равновесия – точки максимума ДСО.

Анализ взаимного расположения графиков функций $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и $\theta(t)$ позволяет рассмотреть следующие две гипотезы:

а) точка пересечения графиков функций $\alpha(t)$ и $\theta(t)$ соответствует левой границе временного интервала интенсивного возрастания угла крена при снижении запаса поперечной остойчивости судна;

б) точка пересечения графиков функций $\beta(t)$ и $\theta(t)$ соответствует моменту потери поперечной остойчивости судна при статическом приложении кренящего момента.

Вычислительные исследования

В целях верификации сформулированных гипотез были выполнены массовые численные эксперименты в формализме представленной ниже математической модели (3) динамики свободно плавающего судна [15]:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{33}) \frac{dv_{\zeta}}{dt} &= \rho g V - D - \sum_{i=1}^{N_p} P_i + R_{2\zeta}, \\ (I_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_{\eta}}{dt} &= M_{\psi} - \rho g V \xi_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \xi_{1p_i} + M_{2\eta}, \\ (I_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} &= M_{\theta} - \rho g V \eta_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \eta_{1p_i} + M_{2x}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\xi_{1c} = \xi_{3c} - \xi_{3g}, \quad \eta_{1c} = \eta_{3c} - \eta_{3g},$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = v_{\zeta}, \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_{\eta}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_x,$$

где m, V, D – соответственно масса, объемное водоизмещение и весовое водоизмещение судна;

I_{xx}, I_{yy} – центральные моменты инерции массы судна относительно продольной и поперечной осей;

$\lambda_{33}, \lambda_{44}, \lambda_{55}$ – присоединенные масса и моменты инерции забортной воды;

$v_{\zeta}, \omega_x, \omega_{\eta}$ – проекция скорости судна на вертикальную ось ζ и угловые скорости при крене и дифференте;

ξ, ψ – вертикальное перемещение и угол дифферента судна;

ρ – плотность забортной воды;

g – гравитационное ускорение;

$\sum P_i, M_{\theta}, M_{\psi}$ – соответственно суммарный вес принятых на судно грузов (в том числе влившейся воды), кренящий и дифферентующий моменты внешних сил;

$R_{2\zeta}, M_{2x}, M_{2\eta}$ – сила и моменты сопротивления воды перемещениям корпуса;

ξ_{3g}, η_{3g} – абсцисса и ордината центра тяжести

судна;

ξ_{1c}, η_{1c} – абсцисса и ордината центра величины судна;

ξ_{1pi}, η_{1pi} – абсцисса и ордината центра тяжести жидкого груза.

Вычислительные исследования выполнялись на базе цифровых моделей корпусов эксплуатируемых на ВВП России водоизмещающих пассажирских судов типовых проектов 26-37, 588, 305, 780, 623, 1730, 1630, 632/252, покрывающих более 71 % всех судов класса «О» [16].

Для каждого из перечисленных проектов пассажирских судов были рассмотрены различные варианты статических наклоняющих моментов и уровней затопления отсеков.

Представленные на рис. 4 результаты расчетов взаиморасположения графиков функций $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\theta(t)$ демонстрируют достоверность гипотезы о возможности их использования в СППР в качестве инструментария оценки риска потери поперечной остойчивости судна по нижеследующей шкале.

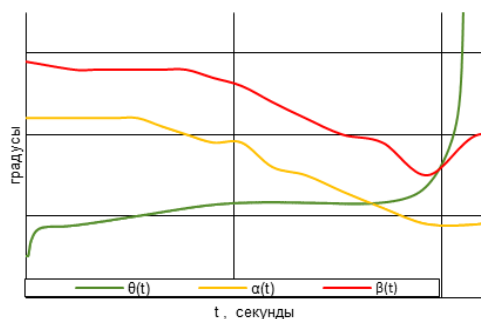


Рис. 4. Пример взаиморасположения графиков функций $\theta(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$.

1) $\theta(t) < \alpha(t)$ – нормальная эксплуатация, крен в допустимых безопасных пределах;

2) $\alpha(t) \leq \theta(t) < \beta(t)$ – повышенная опасность, возможно быстрое прогрессирующее увеличение крена;

3) $\theta(t) \geq \beta(t)$ – предельная ситуация, опрокидывание судна неизбежно.

По мере затопления отсеков судна изменяются его нагрузка и посадка, соответственно перестраиваются ДСО и кривые $\alpha(t)$ и $\beta(t)$.

Результаты непрерывного мониторинга вышеприведенной шкалы соотношений $\theta(t)$ и пороговых значений поперечной остойчивости судна являются информационной основой принятия капитаном своевременного решения об эвакуации людей с аварийного судна.

Модель и алгоритм функционирования СППР

Программный комплекс СППР состоит из следующих основных блоков (рис. 5):

- блок ввода и расчета исходных данных весовой нагрузки;
- блок расчета ДСО;
- блок расчета и построения функций $\alpha(t)$ и $\beta(t)$;
- блок оценки риска потенциально возможного опрокидывания судна

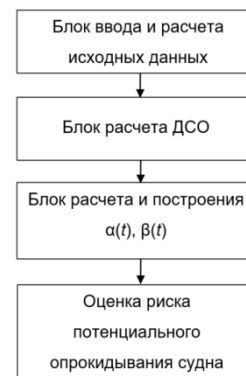


Рис. 5. Архитектура СППР.

При построении ДСО судна конкретного проекта учитываются следующие данные:

- геометрия корпуса при текущих параметрах посадки;
- нагрузка масс судна порожнем;
- весовые данные по твердым грузам (пассажиры, багаж, провизия);
- весовые данные по жидким грузам (запасы топлива и воды, жидкий балласт).

Информация о жидких грузах актуализируется показаниями датчиков уровня в цистернах. Наличие воды в отсеках отслеживается датчиками затопления.

Расчет текущей весовой нагрузки и координат центра тяжести производится с учетом всех статей нагрузки.

Алгоритм расчета ДСО основан на решении уравнения плавучести методом последовательных приближений.

По текущим параметрам посадки вычисляются координаты центра величины y_c , z_c . Затем с шагом $\Delta\theta$ для каждого дискретного значения угла крена θ по формуле (4) рассчитываются плечи статической остойчивости

$$l(\theta) = y_c \cos(\theta) + (z_c - z_{c_0}) \sin(\theta) - (z_{g_1} - z_{c_0}) \sin(\theta), \quad (4)$$

при $\theta = 0^\circ, \dots, \theta_{\text{зак}}$, где $\theta_{\text{зак}}$ – угол заката ДСО z_{c_0} – аппликата центра величины; z_{g_1} – аппликата центра тяжести для текущего состояния нагрузки судна.

Отслеживание изменения нагрузки судна осуществляется посредством датчиков крена, дифферента, осадки, уровня жидкости в отсеках и цистернах.

С целью мониторинга остойчивости судна в процессе выполнения судном установленного рейса данные по его текущей нагрузке обновляются, и ДСО рассчитывается с установленной периодичностью. Блок-схема расчета ДСО представлена на рис. 6.

Функции интенсивности $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ строятся по значениям углов крена, соответствующих точкам типа А и типа В на каждом временном шаге построения ДСО.

Анализ взаиморасположения графиков этих функций интенсивности позволяет определить начальный момент снижения поперечной остойчивости судна.



Рис. 6. Блок-схема построения ДСО.

Разработка прототипа СППР

С целью верификации разработанного модельно-алгоритмического обеспечения СППР на основе теоретического чертежа корпуса пассажирского судна массового проекта 26-37 была построена его 3D-модель и на станке с числовым программным управлением изготовлена физическая копия модели (рис. 7) с отсеком для затопления в кормовой части.

Выбранный масштаб 1:75 модели корпуса судна обеспечил удовлетворительную точность измерений и технологичность изготовления.

Система управления СППР выполнена по трехуровневой схеме (рис. 8). Нижний уровень включает датчики крена, дифферента, осадки, уровня жидкости в отсеках.



Рис. 7. Трехмерная модель корпуса судна.

Средний уровень – микроконтроллер, обеспечивающий сбор и первичную обработку данных, поступающих с нижнего уровня (рис. 9).

Верхний уровень – операторская станция, выполняющая расчеты в реальном времени, реализована на компьютере с программным обеспечением для мониторинга остойчивости в реальном времени.

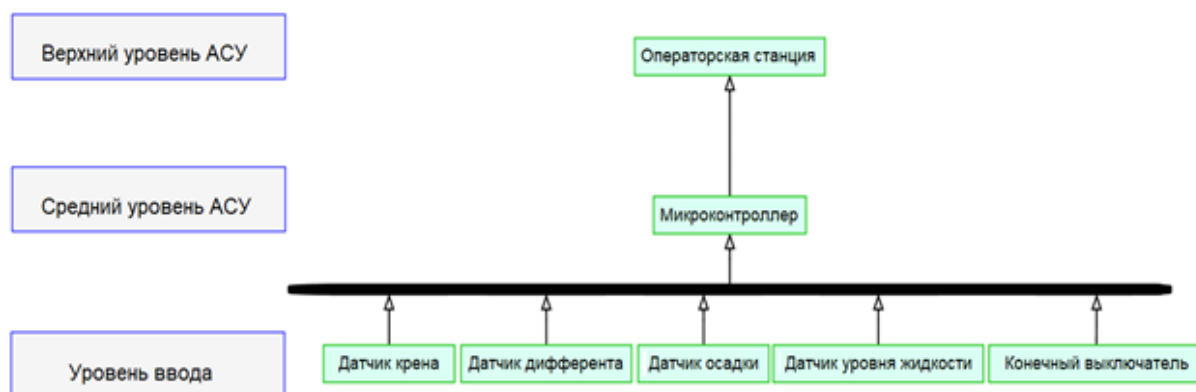


Рис. 8. Схема системы управления СППР.

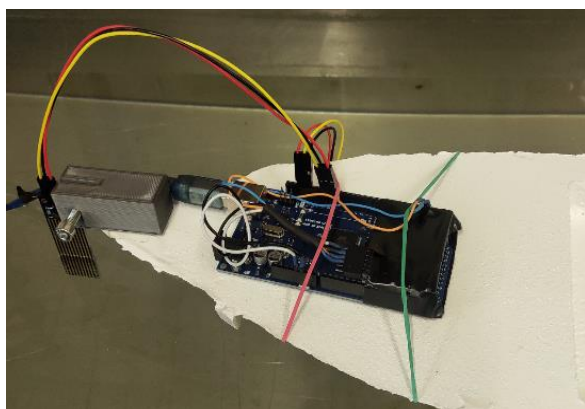


Рис. 9. Датчики и микроконтроллер на модели.

Реализованное на алгоритмическом языке C++ программное обеспечение [17] выполняет следующие функции:

- сбор данных по геометрии и нагрузке судна;

- расчет текущих значений функций $\alpha(t)$ и $\beta(t)$;
- мониторинг остойчивости поперечной остойчивости судна в реальном времени;
- оценка риска потери поперечной остойчивости судна.

На мониторе СППР отображаются текущие значения крена, дифферента, осадки, координат центра тяжести, графики функций $\alpha(t)$ и $\beta(t)$, а также соответствующая концепции ALARP [18] цветовая диаграмма категорий риска (рис. 10).

Перед выполнением натурных экспериментов на физической модели корпуса судна была выполнена статическая тарировка с целью обеспечения заданных масштабированных значений нагрузки и координат центра тяжести.

Собственно натурные эксперименты включали два этапа. На первом этапе определялись углы крена, соответствующих границам категорий риска при различных уровнях затопления отсека и оценивалась метацентрическая высота. На втором

этапе осуществлялось построение графиков функций $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ в процессе затопления отсека до момента опрокидывания модели.

Натурные эксперименты с физической моделью корпуса судна показали несущественное отклонение

полученных результатов от расчетных данных, подтвердив таким образом работоспособность прототипа СППР.

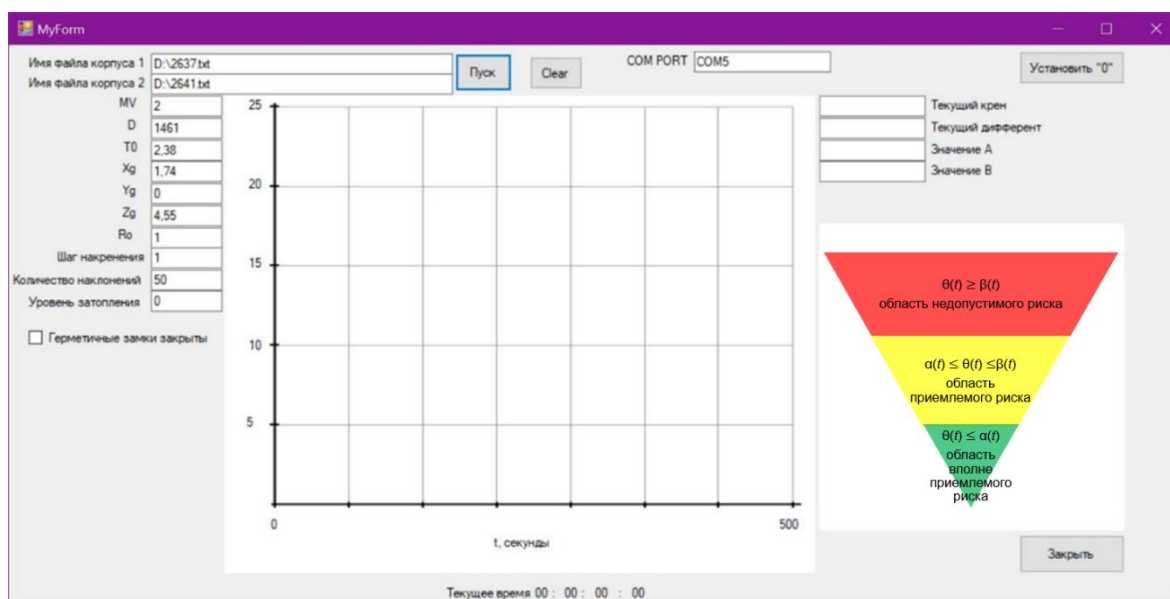


Рис. 10. Интерфейс программного обеспечения СППР.

В целях последующего анализа и расследования возможных инцидентов, связанных с потерей поперечной остойчивости судна, в СППР осуществляется архивирование параметров его поперечной остойчивости с привязкой к текущему времени. Пример фрагмента архивного файла представлен на рис. 11.

Время	Крен	Дифферент	Значение А	Значение В
15:18:46:259	12,7	12,7	17	23
15:18:47:33	9,4	12,7	17	23
15:18:47:785	9,4	12,7	17	23
15:18:48:541	12,7	9,4	17	23
15:18:49:968	12,7	9,4	17	23
15:18:50:950	12,7	9,4	17	23
15:18:51:962	12,7	9,4	17	23
15:18:52:972	12,6	9,4	17	23
15:18:53:988	12,8	9,4	17	23
15:18:54:987	12,6	9,4	17	23
15:18:55:994	12,8	9,4	17	23

Рис. 11. Пример фрагмента архивного файла СППР.

Выводы

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработано модельно-алгоритмическое обеспечение для автоматизированной системы поддержки принятия решений капитаном при угрозе потери поперечной остойчивости речного пассажирского водоизмещающего судна.

Ключевыми преимуществами разработанной системы является нижеследующее.

1. Учет динамики изменения поперечной остойчивости при затоплении отсеков.
2. Возможность оценки риска потери поперечной остойчивости в реальном времени.
3. Наглядная визуализация текущего состояния судна и прогноза его изменения.
4. Масштабируемость СППР к различным типам судов в пределах установленного диапазона соотношений главных размерений.

Внедрение СППР на речных судах будет способствовать снижению уровня влияния человеческого фактора на принятие решений в критических ситуациях и повышению безопасности судоходства на ВВП России.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

1. Расширение диапазона применимости разработанного модельно-алгоритмического обеспечения СППР для судов функционально других типов.
2. Учет динамических факторов внешней среды.
3. Интеграцию СППР с другими судовыми системами.
4. Разработку рекомендаций по корректировке нормативных документов в части критериев принятия решения об эвакуации пассажиров и экипажа при угрозе потери судном поперечной остойчивости.

Литература

1. Анализ и состояние аварийности / Госморпечнадзор – URL: <https://rostransnadzor.gov.ru/rostransnadzor/podrazdeleniya/sea/deyatelnost-podrazdeleniya/81> (дата обращения: 07.10.2024).
2. Разработка требований Правил Российского Речного Регистра к выбору и количеству спасательных средств для спасения людей при скоротечных авариях [Текст]: отчет о НИР (промежуточный): 28 / Волжская государственная академия водного транспорта; рук. Этин В.Л.; исполнитель Лобастов В.П. [и др.]. Н.Новгород, 2014. Договор №Р123/14-44/09/1402 от 03.04.2014г.

3. Вай Ян Вин Хтве. Оценка обеспечения безопасности судна на начальных стадиях проектирования. Диссертация на соискание степени канд. техн. наук по специальности 05.08.03 «Проектирование и конструкция судов». – Санкт-Петербург, 2021 – 210 с.
4. Ершов, А.А. Способы выживания людей при морских и речных авариях // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 4 (38). – С. 15–22.
5. Валяев, А.В. О компьютерной поддержке эффективного использования спасательных средств при угрозе скоротечной аварии судна / Лобастов В.П. Поселенов Е.Н. Федосенко Ю.С. Этин В.Л. // Речной транспорт (XXI век), №3, 2016. – С. 58-63.
6. Российское Классификационное Общество [Электронный ресурс] / Правила классификации и постройки судов // Режим доступа <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/pravila-klassifikatsii-i-postroyki-sudov/> (дата обращения: 02.08.2024).
7. Причиной крушения теплохода "Некрасов" стал перегруз / [Электронный ресурс] // РИА Новости: [сайт] – URL: <https://ria.ru/20060215/43558585.html> (дата обращения: 28.10.2024).
8. Ространснадзор: «Булгария» затонула из-за открытых иллюминаторов / [Электронный ресурс] // БИЗНЕС Online: [сайт]. – URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/44936> (дата обращения: 28.10.2024).
9. Судно «Невский-4» получило повреждения и выбросилось на мель / [Электронный ресурс] // Морские вести России: [сайт]. – URL: <https://morvesti.ru/news/1679/63416/> (дата обращения: 28.10.2024).
10. На Рыбинском водохранилище опрокинулась баржа / [Электронный ресурс] // Рыбинские известия: [сайт]. – URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2020/08/28/73338> (дата обращения: 28.10.2024).
11. Названы причины крушения траулера "Онега" и гибели 17 человек // Интерфакс: новости URL: <https://www.interfax.ru/russia/754140> (дата обращения: 22.09.2024).
12. Сизов, В.Г. Теория корабля. – Одесса: «Феникс», 2008. – 462 с.
13. Valyaev, A.V. Vessel dynamics modelling for a decision support system in the threat of rapid flooding / A.V. Valyaev, Y.S. Fedosenko, E.A. Lukina // Journal of Physics: Conference Series: 13, Saint Petersburg, 06 – 08 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2021. – P. 012152. DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012152.
14. Ершов, А.А. Способы выживания людей при морских и речных авариях // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 4 (38). – С. 15–22.
15. Валяев, А.В. Динамика опрокидывания водоизмещающего судна при затоплении и действии наклоняющего момента / Валяев А.В., Ваганов А.Б., Лукина Е.А., Самосюк А.И., Федосенко Ю.С. // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 1-1(47). – С. 23-27. – DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.055.
16. Поиск судов в регистровой книге / [Электронный ресурс] // Российское Классификационное Общество: [сайт] – URL: <https://rfclass.ru/activities/class/regbook/> (дата обращения: 31.10.2023).
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022612189 Российская Федерация. Программа для построения кривых интенсивности изменения пороговых значений характеристик остойчивости речного водоизмещающего судна: №2021681054: заявл. 17.12.2021: опубл. 08.02.2022 / А.В. Валяев, А.Г. Ключев, Е.А. Лукина; заявитель ООО «Научно-производственная фирма «Штурвал».
18. ГОСТ Р 58771-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Технологии оценки риска.

References

1. Analiz i sostoyanie aviarnosti / Gosmorrechnadzor [Analysis and State of Accident Rates] – URL: <https://rostransnadzor.gov.ru/rostransnadzor/podrazdeleniya/sea/deyatelnost-podrazdeleniya/81> (access date: 07.10.2024).
2. Razrabotka trebovaniy Pravila Rossiyskogo Rechnogo Registr k vybore i kolichestvu spasatel'nykh sredstv dlya spaseniya lyudey pri skorotecnikh avariakh [Development of Requirements of the Russian River Register Regulations for the Selection and Quantity of Rescue Equipment for Saving People in Rapid Accidents]: Otchet o NIR (promezhutochn.): 28 / Volzhskaya gosudarstvennaya akademiya vodnogo transporta; ruk. Eitin V.L.; ispoln. Lobastov V.P. [et al.]. N. Novgorod, 2014 Dogovor №R123/14-44/09/1402 ot 03.04.2014.
3. Vai Yan Vin Khteva. Otseuka obespecheniya bezopasnosti sudna na nachal'nykh stadiyakh proektirovaniya [Assessment of Ship Safety Provision at the Initial Stages of Design]. Dissertatsiya na soiskanie stepeni kan. tekhn. nauk po special'nosti 05.08.03 "Proektirovaniye i konstruktsiya sudov". Sankt Peterburg, 2021 – 210 s.
4. Ershov, A.A. Sposoby vyzhivaniya lyudey pri morskikh i rechnykh avariakh [Ways of Survival for People in Marine and River Accidents] / Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S.O. Makarova. 2016 No4(38), pp. 15–22.
5. Valyaev, A.V. O komp'yuternoy podderzhke effektivnogo ispol'zovaniya spasatel'nykh sredstv pri ugroze skorotечноy avarii sudna / Lobastov V.P., Poselenov E.N., Fedosenko Yu.S., Eitin V.L. [On Computer Support for the Effective Use of Rescue Equipment in the Threat of Rapid Flooding of a Vessel] / Rechnoi transport (XXI vek), 2016 No 3 pp. 58-63.
6. Rossiyskoye Klassifikatsionnoye Obshchestvo [Russian Classification Society] [Electronic resource] / Pravila klassifikatsii i postroyki sudov [Rules for the Classification and Construction of Vessels] / Rezhim dostupa <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/pravila-klassifikatsii-i-postroyki-sudov/> (access date: 02.08.2024).
7. Prichinoy krusheniya teplokhoda "Nekrasov" stal peregruz [The Cause of the "Nekrasov" Shipwreck Was Overloading] / [Electronic resource] / RIA Novosti: [site]. URL: <https://ria.ru/20060215/43558585.html> (access date: 28.10.2024).

8. Rostransnadzor: "Bulgariya" zatonula iz-za otkrytykh illuminatorov [Rostransnadzor: "Bulgaria" Sunk Due to Open Portholes] / [Electronic resource] / BIZNES Online: [site]. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/44936> (access date: 28.10.2024).
9. Sudno "Nevskiy-4" poluchilo povrezhdeniya i vybrosilos na mel' [The Vessel "Nevsky-4" Sustained Damage and Grounded] / [Electronic resource] / Morskie vesti Rossii: [site]. URL: <https://morvesti.ru/news/1679/63416/> (access date: 28.10.2024).
10. Na Rybinskom vodokhranilishche oprokinulasyazharja [A Barge Capsized in the Rybinsk Reservoir] / [Electronic resource] / Rybinskie izvestiya: [site]. URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2020/08/28/73338> (access date: 28.10.2024).
11. Nazvany prichiny krusheniya traulera "Onega" i gibeli 17 chelovek [The Causes of the Trawler "Onega" Sinking and the Death of 17 People Named] / Interfaks: novosti URL: <https://www.interfax.ru/russia/754140> (access date: 22.09.2024).
12. Sizov, V.G. Teoriya korablya [Theory of the Ship]. Odessa: "Feniks", 2008 – 462 s.
13. Valyaev, A.V. Vessel dynamics modelling for a decision support system in the threat of rapid flooding / A.V. Valyaev, Y.S. Fedosenko, E.A. Lukina / Journal of Physics: Conference Series: 13, Saint Petersburg, 06 – 08 October 2020. Saint Petersburg, 2021 – P. 012152. DOI:10.1088/1742-6596/1864/1/012152.
14. Ershov, A.A. Sposoby vyzhivaniya lyudey pri morskikh i rechnykh avariyaх [Ways of Survival for People in Marine and River Accidents] / Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2016 No4(38), pp. 15–22.
15. Valyaev, A.V. Dinamika oprokidyvaniya vodoizmeshchayushchego sudna pri zatopenii i deystvii naklonyayushchego momenta / A.V. Valyaev, A.B. Vaganov, E.A. Lukina, A.I. Samosyuk, Yu.S. Fedosenko [Dynamics of Capsizing of a Displacement Vessel During Flooding and the Action of the Inclining Moment] / Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020 No1-1(47), pp. 23-27. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.055.
16. Poisk sudov v registrovoy knige [Ship Search in the Register Book] / [Electronic resource] / Rossiyskoye Klassifikatsionnoe Obshchestvo: [site]. URL: <https://rfclass.ru/activities/class/regbook/> (access date: 31.10.2023).
17. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2022612189 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate of State Registration of Software No2022612189 Russian Federation]. Programma dlya postroyeniya krivyykh intensivnosti izmeneniya porogovykh znacheniy kharakteristik ostroychivosti rechnogo vodoizmeshchayushchego sudna [Program for Constructing Curves of Intensity of Change of Threshold Values of Stability Characteristics of River Displacement Vessel]: №2021681054: zayavl. 17.12.2021: opubl. 08.02.2022 / A.V. Valyaev, A.G. Klyuchev, E.A. Lukina; zayavitel' OOO "Nauchno-proizvodstvennaya firma "Shturval".
18. GOST R 58771-2019. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska [GOST R 58771-2019. National Standard of the Russian Federation. Risk Management. Risk Assessment Technologies].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурмистров Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, проректор по научной и инновационной деятельности, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Валяев Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Систем информационной безопасности управления и телекоммуникаций, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: wav-dk@mail.ru

Alexander V. Valyaev, Ph.D. (Eng), Senior Lecturer, Department of Information Security Systems Management and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: wav-dk@mail.ru

Лукина Евгения Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры Гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: evair@yandex.ru

Evgeniya A. Lukina, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Shipping, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: evair@yandex.ru

Федосенко Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем информационной безопасности управления и телекоммуникаций, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Yuri S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Security Systems Management and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 11.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024.

Научная статья

УДК 504.064:656.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.062>

Идентификация событий при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры

Домнина О.Л.¹ o-domnina@yandex.ru, Пластинин А.Е.¹ plastininae@yandex.ru,Маценко С.В.² msv@ujniimf.ru, Отделкин Н.С.¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта, ²АО «ЮЖНИИМФ»

Аннотация. Для разработки планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти необходима адекватная система оценки рисков. Одним из элементов данной системы является идентификация возможных событий при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры, что является целью представленной работы. Для реализации этой цели проанализированы исследования отечественных и зарубежных ученых. В результате проведенного анализа различных методов, используемых для идентификации рисков, авторы выбрали метод «дерева отказов» как наиболее подходящий для анализа широкого спектра причин сбоев различного характера при разливах нефти и нефтепродуктов. Используя его, авторами были разработаны типовые сценарии аварий, а также выполнен анализ их причин. В качестве примера в работе представлено несколько созданных «дереьев отказов» для различных типовых сценариев. Далее, авторами были апробированы предложенные процедуры идентификации и оценки риска развития чрезвычайных ситуаций на примере нефтяного терминала в морском порту Туапсе.

Ключевые слова: анализ рисков, разливы нефти и нефтепродуктов, идентификация рисков, типовые сценарии аварий, дерево отказов, алгоритм оценки риска.

Для цитирования: Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Маценко С.В., Отделкин Н.С. Идентификация событий при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 79—88. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.062

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.062>

Identification of events in case of oil spills from ships and transport infrastructure facilities

Olga L. Domnina¹ o-domnina@yandex.ru, Andrey E. Plastin¹ plastininae@yandex.ru,Sergey V. Macenko² msv@ujniimf.ru, Nikolay S. Otdelkin¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru¹ Volga State University of Water Transport, Russian Federation, ² Southern Marine Scientific Research and Design Institute named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union I.S. Isakov, Russian Federation

Abstract. An adequate risk assessment system is needed to develop plans for the prevention and elimination of oil spills. One of the elements of this system is the identification of possible events in case of oil spills from ships and transport infrastructure facilities, which is the purpose of the presented work. To achieve this goal, the research of domestic and foreign scientists was analyzed. As a result of the analysis of various methods used to identify risks, the authors chose the "failure tree" method as the most suitable for analyzing a wide range of causes of failures of various types in oil and petroleum product spills. Using it, the authors have developed typical accident scenarios, as well as an analysis of their causes. As an example, the paper presents several "failure trees" for various typical scenarios. Further, the authors tested the identification and assessment of the risk of emergency situations on the example of an oil terminal in the seaport of Tuapse.

Key words: risk analysis, oil and oil product spills, risk identification, typical accident scenarios, fault tree, risk assessment algorithm.

For citation: Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Sergey V. Macenko, Nikolay S. Otdelkin, Identification of events in case of oil spills from ships and transport infrastructure facilities, Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 79—88. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.062

Введение

Для разработки планов по предупреждению и разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛРН) необходимо иметь адекватную систему оценки риска.

Вопросам оценки риска разливов нефти посвящено достаточно большое количество исследований. В одних рассматриваются аспекты, связанные с нахождением участков концентрации транспортных происшествий и пространственного анализа риска [1, 2], другие посвящены идентификации неблагоприятных техногенных

событий [3, 4], третьи – вопросам прогнозирования последствий наступления аварий [5, 6, 7]. Часть работ посвящена разработке мероприятий по ликвидации последствий аварий [8, 9, 10, 11].

Вопросам разработке системы управления рисками в целом уделено незначительное количество работ.

Идеи по управлению безопасностью процессов можно найти в источниках [12, 13, 14, 15]. Данные публикации дают общее представление об уязвимых элементах в рамках каждого компонента системы идентификации рисков.

В исследованиях [12, 13] представлены лучшие практики по мнению группы мировых лидеров отрасли выявлению рисков. Для выявления рисков мы решили определить основные причины аварий используя метод анализа дерева отказов в качестве инструмента исследования основных причин. Хотя существуют другие инструменты идентификации, такие как методы «пяти вопросов» и диаграмма «рыбий скелет», мы сочли их неприменимыми в контексте нашего анализа. Действительно, метод «пяти вопросов» является относительно простым инструментом, который использует линейную последовательность логических рассуждений для выявления единственной первопричины данного сбоя и, следовательно, не подходит для выявления множества первопричин аварий. Диаграмма «рыбий скелет» — это инструмент, основанный на категориях, в котором необходимо заранее тщательно определить ряд категорий причин, которые являются потенциальными участниками событий. Успех результирующего анализа зависит от правильного выбора категории сбоя, и поэтому неправильный выбор категории может привести к игнорированию некоторых первопричин [13]. Для сравнения, метод «дерева отказов» представляет собой нисходящий дедуктивный инструмент анализа, использующий логические схемы для объединения (прямо или косвенно) ряда основных и промежуточных событий, которые приводят к главному событию (обычно нежелательному отказу). Он широко используется в технике безопасности и надежности в качестве мощного инструмента для выявления логических взаимосвязей между потенциальным инцидентом и соответствующими первопричинами в виде древовидной диаграммы и для предложения контрмер или барьеров для предотвращения сбоя или инцидента [14].

Целью данного исследования является идентификация событий при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры.

Для достижения указанной цели авторы поставили перед собой следующие задачи:

- разработать алгоритм оценки риска чрезвычайных ситуаций при разливах нефти (ЧС(Н)) с судов и объектов транспортной инфраструктуры;
- выделить в этом алгоритме элемент идентификации событий (опасностей);
- выбрать метод идентификации событий при ЧС(Н) на водном транспорте;
- разработать типовые сценарии аварий и выполнить анализ их причин;
- апробировать предложенный подход на примерах.

Материалы и методы

Перед проведением процедур анализа и оценки риска выполняется сбор необходимых исходных данных, отображающих параметры технологической схемы операций с нефтью и нефтепродуктами и

достаточных для выполнения расчётов по объёму возможных разливов. Перечень исходных данных включает следующую информацию:

- сведения о субъекте функциональной подсистемы организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в море или на внутренних водных путях с судов и объектов независимо от их ведомственной и национальной принадлежности (ФПЛРН);
- номенклатура и свойства нефти и нефтепродуктов, участвующих в технологических схемах;
- технические характеристики всех объектов, задействованных в технологических схемах;
- технические показатели реагирования привлекаемых сил и средств на случай аварии.

Процедура управления риском (рис.1) включает следующие основные этапы:

1. идентификацию событий (опасностей) при разливах нефти с судов и объектов транспортной инфраструктуры;
2. оценку риска (включающую определение вероятности/частоты и возможных последствий от каждого выявленного источника опасности);
3. анализ риска;
4. выявление и обобщение перечня источников опасности для субъекта риска;
5. оформление результатов оценки риска для дальнейшей разработки плана мероприятий по ликвидации ЧС(Н) (ЛЧС(Н)).

При этом оценка риска выполняется также поэтапно:

- сначала она производится применительно к каждому объекту, задействованному в технологической схеме, для выяснения к компетенции какого уровня субъекта ФПЛРН риск относится.
 - затем, выполняется окончательная оценка риска и классификация ЧС(Н) по факторам риска.
- Как уже упоминалось в ранее опубликованном исследовании [11] источники опасности ЧС(Н), возникающие на судах в морских и речных портах, на подходах к ним, при переходах в пределах морских бассейнов и бассейнов внутренних водных путей (ВВП), а также при переходах между водными бассейнами, должны быть отнесены к компетенции государственных органов Минтранса России различных уровней.

В результате оценки риска ЧС(Н) формируется перечень объектов транспортного комплекса, входящих в сферу ответственности рассматриваемого субъекта ФПЛРН. Отдельно предлагается формировать перечни объектов транспортного комплекса, относящихся к компетенции государственных органов Минтранса России для включения их в Планы ПЛРН объектового, регионального и федерального уровней.

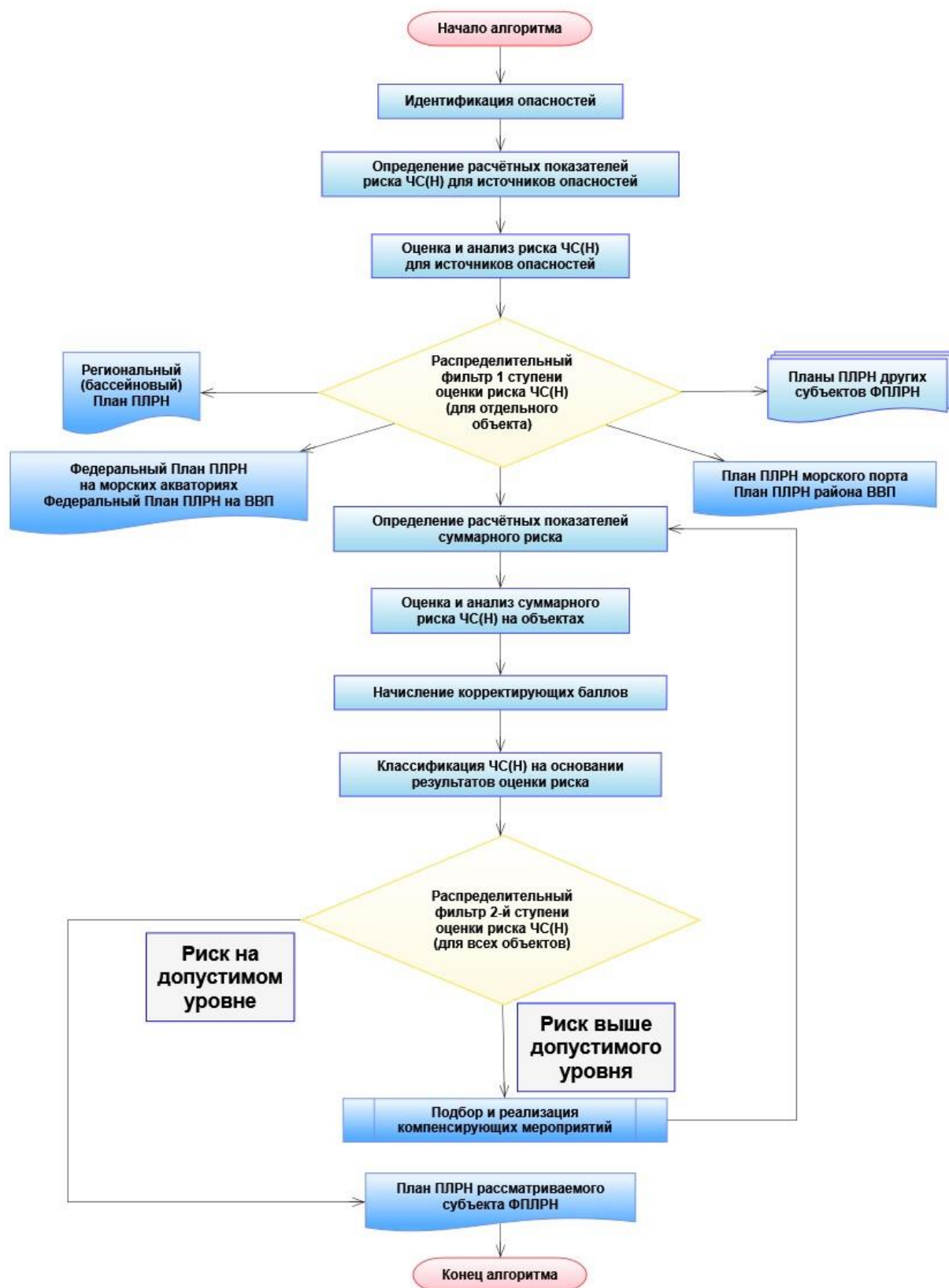


Рис. 3. Алгоритм выполнения оценки риска ЧС(Н)

На этапе выявления опасностей рекомендуется:

- проанализировать достоверность исходных данных;
- разделить технологические схемы на составные части;

- проанализировать условия возникновения и развития аварий;
- выявить группы характерных сценариев ЧС(Н).

Анализ причин возникновения ЧС(Н) на объектах водного транспорта и объектах транспортной инфраструктуры, проведенный авторами позволяет отнести их к следующим группам:

- неполадки оборудования (например, вызванные коррозией, износом, сбоями в работе и другими технологическими причинами);
- «человеческим фактором» (например, халатностью при осуществлении контроля за эксплуатацией технических устройств);
- внешние причины (например, шторм, происшествия на соседних объектах и оказывающих воздействие на судно, вмешательство третьих лиц).

Поэтому в качестве метода выявления рисков был выбран метод «дерева отказов» как наиболее подходящий для тщательного и всестороннего анализа широкого спектра причин сбоев различного характера (аппаратных, организационных, человеческих и т.д.).

Итогом этапа выявления опасностей может быть реестр рисков, включающий:

- принадлежность к субъекту ФПЛРН;
- причины возникновения ЧС(Н);
- расчётный объём разлива и его возможные последствия.

Результаты и обсуждения

Типовые сценарии аварий и анализ их причин на примере выполнения бункеровочных операций, рейдовой перегрузки нефти и нефтепродуктов, эксплуатации нефтеналивных судов и терминалов приведены в табл. 1.

При этом под сценарием аварии понимается последовательность связанных событий, приводящих к аварии с конкретными опасными последствиями.

Для описания приведенных сценариев необходимо учитывать: причину аварии и ее последствия, характеристику причинно-следственных связей. Это описание опирается на анализ вероятных аварийных ситуаций.

При выполнении оценки риска ЧС(Н) при осуществлении хозяйственной деятельности на объектах водного транспортного комплекса для идентификации опасностей должны рассматриваться группы сценариев развития возможных аварий. Анализ причин аварий рекомендуется выполнять с применением деревьев отказов (происшествий). Примеры таких деревьев отказов для каждой группы сценариев представлены на рисунках 2-4.

Таблица 1

Типовые сценарии аварий при эксплуатации объектов морского и внутреннего водного транспорта, а также объектов транспортной инфраструктуры

Наименование группы	Бункеровочные операции	Рейдовая перегрузка нефти и нефтепродуктов	Эксплуатация нефтеналивных причалов и нефтяных терминалов	Перевозка нефти и нефтепродуктов нефтеналивными судами
Группа сценариев С1	Небольшое повреждение бункеровочного шланга (например, трещина, неплотность фланцевого соединения и пр.)	Небольшое повреждение перегрузочного шланга (трещина, неплотность фланцевого соединения и пр.)	Небольшое повреждение перегрузочных технологических трубопроводов (трещина, неплотность фланцевого соединения и пр.)	Небольшое повреждение судовых палубных трубопроводов (трещина, неплотность фланцевого соединения и пр.)
Группа сценариев С2	Последствия нарушения технологической дисциплины при выполнении работ (переливы, проливы при шланговке / отшланговке, проливы при отборах проб и пр.)	Последствия нарушения технологической дисциплины при выполнении работ (переливы, проливы при шланговке / отшланговке, проливы при отборах проб и пр.)	Последствия нарушения технологической дисциплины при выполнении работ (переливы, проливы при шланговке / отшланговке, проливы при отборах проб и пр.)	Последствия нарушения технологической дисциплины при выполнении работ (переливы, проливы при шланговке / отшланговке, проливы при отборах проб и пр.)
Группа сценариев С3	Разрыв бункеровочного шланга вследствие гидроудара или внешнего воздействия (частичный или полный, гильотинный разрыв и пр.)	Разрыв перегрузочного шланга вследствие гидроудара или внешнего воздействия (частичный или полный, гильотинный разрыв и пр.)	Аварийное отсоединение стендера или разрыв перегрузочного шланга вследствие гидроудара или внешнего воздействия (частичный или полный, гильотинный разрыв и пр.)	Разрыв судового палубного трубопровода вследствие гидроудара или внешнего воздействия (частичный или полный, гильотинный разрыв и пр.)

Наименование группы	Бункеровочные операции	Рейдовая перегрузка нефти и нефтепродуктов	Эксплуатация нефтеналивных причалов и нефтяных терминалов	Перевозка нефти и нефтепродуктов нефтеналивными судами
Группа сценариев С4	Повреждение борта и (или) днища задействованных судов (столкновения, навалы и пр.)	Повреждение борта и (или) днища задействованных судов (столкновения, навалы и пр.)	Повреждение нескольких стэндеров (грузовых шлангов) при навале или выходе из зоны обслуживания расчётного судна (обрыв швартовых, столкновение судов)	Повреждение борта и (или) днища задействованных судов (столкновения, навалы и пр.)
Группа сценариев С5	Последствия воздействия на задействованные объекты комплекса штормовых (волновых, ветровых, гидродинамических) нагрузок, действующих в районе осуществления деятельности, с учётом установленных для осуществления деятельности ограничений по погодным условиям	Последствия воздействия на корпуса задействованных судов комплекса штормовых (волновых, ветровых, гидродинамических) нагрузок, действующих в районе осуществления деятельности, с учётом установленных для осуществления деятельности ограничений по погодным условиям	Последствия воздействия на резервуары хранения и ёмкости для нефти и нефтепродуктов комплекса катастрофических нагрузок, действующих в районе осуществления деятельности, с учётом имеющихся локальных особенностей расположения резервуарного парка относительно водного объекта	Последствия воздействия на корпуса задействованных судов комплекса штормовых (волновых, ветровых, гидродинамических) нагрузок, действующих в районе осуществления деятельности, с учётом установленных для осуществления деятельности ограничений по погодным условиям

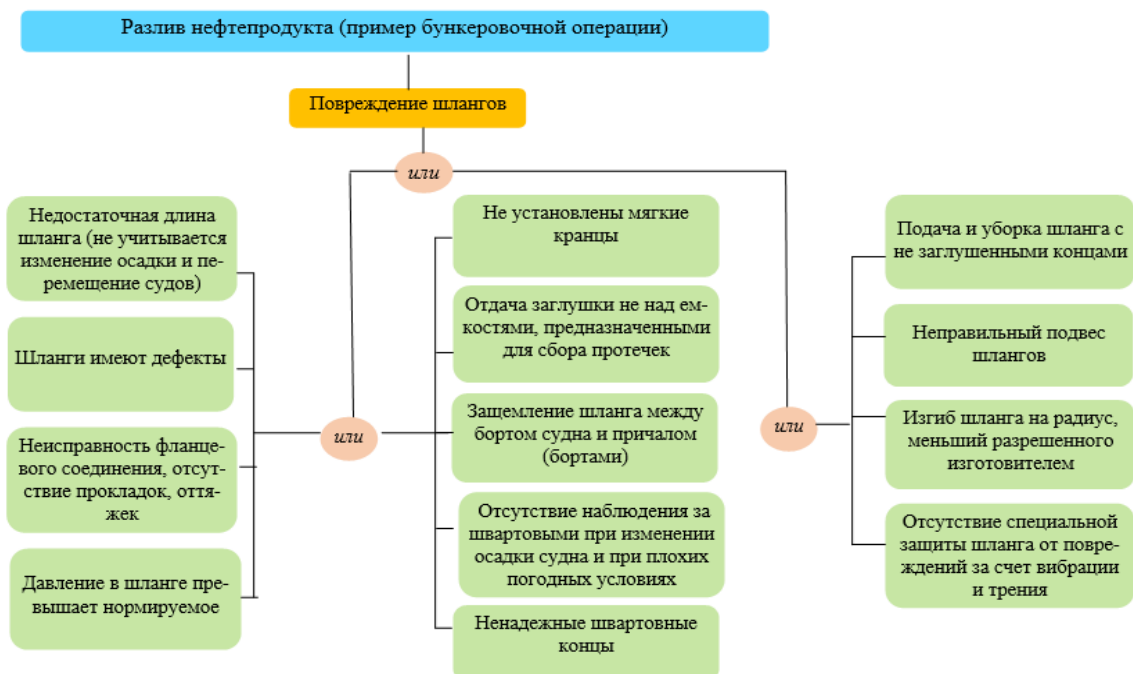


Рис. 2. Пример «дерева» отказов (происшествий) для группы сценариев С1

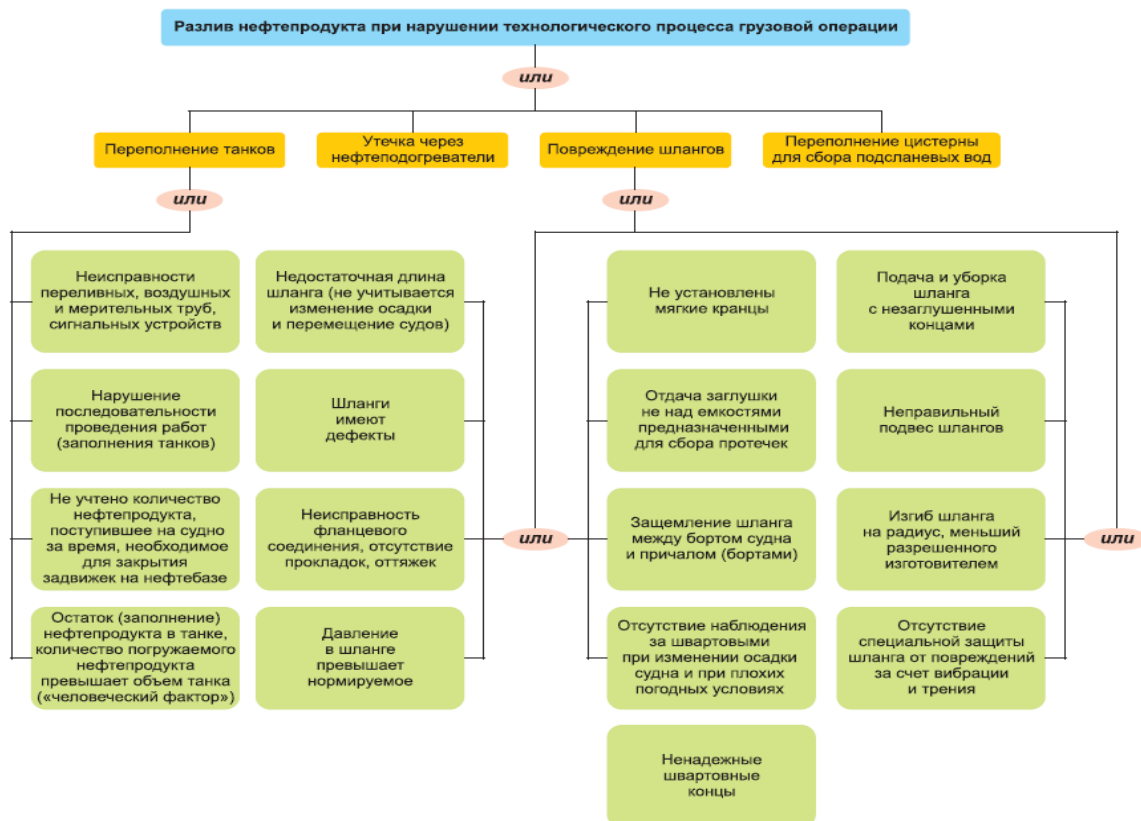


Рис. 3. Пример «дерева» отказов (происшествий) для группы сценариев С2



Рис. 4. Пример «дерева» отказов (происшествий) для группы сценариев С3

Анализ последствий выявил, что при наиболее неблагоприятном сценарии развития аварии весь объем утечки при малом повреждении трубопровода или перегрузочного шланга (например, в результате трещины, неплотности фланцевого соединения) может поступить в акваторию.

Переливы, проливы при шланговке / отшланговке, проливы при отборах проб и прочие подобные инциденты происходят, как правило, в начальном

или завершающем этапах грузовых операций, которые характеризуются работой насосных установок на минимальной подаче. Анализ последствий таких аварий выявил, что при наиболее неблагоприятном сценарии развития аварии не менее 50 % объема утечки может поступить в акваторию.

При частичном или полном, гильотинном разрыве трубопровода (шланга), аварийном отсоединении

стендера в акваторию с высокой степенью вероятности поступит весь объем прогнозируемых разливов.

Повреждение борта и (или) днища нефтеналивного судна может произойти в результате, например, ударе стороннего судна или посадки судна на мель. Расположение расчётного повреждения корпуса (борта и днища) следует рассматривать в наиболее неблагоприятном месте: с нарушением герметичности двух наибольших грузовых танков. Размеры повреждённых грузовых танков (длина и ширина), необходимые для расчётов, следует снимать с чертежей судовой документации, являющейся обязательным приложением к исходным данным для анализа и оценки риска ЧС(Н).

В случае аварий при осуществлении бункеровки судов необходимо предусматривать сценарии повреждения корпуса бункеруемого судна в районе расположения наибольшего по вместимости бункерного танка (цистерны запаса топлива). Как правило, этот район корпуса не защищён двойными бортами или двойным дном, поэтому возможен вылив 100 % вместимости наибольшего бункерного танка. При этом данный сценарий следует относить к компетенции судовладельца бункеруемого судна.

При рассмотрении аварий на нефтяных терминалах и наливных причалах необходимо предусматривать сценарии повреждения нескольких стендеров или обрыва грузовых шлангов вследствие навала или выхода нефтеналивного судна из зоны обслуживания на максимальной производительности грузовых операций. Такая аварийная ситуация может быть следствием обрыва швартовых тросов, несанкционированной отдачи самоотдающихся швартовых гаков, обрыва кнехтов и швартовых тумб при превышении расчётных нагрузок, других навигационных происшествий, связанных с аварийным смещением обслуживаемого нефтеналивного судна относительно причала. В таких сценариях рекомендуется предусмотреть повреждения или обрывы максимального количества стендеров или шлангов, задействованного для обеспечения максимальной производительности грузовых операций.

При оценке катастрофических воздействий на объекты водного транспорта и транспортной инфраструктуры комплекса штормовых (совокупности волновых, ветровых, гидродинамических) нагрузок, следует учитывать установленные для осуществления деятельности ограничения по погодным условиям в районе осуществления деятельности. Так, при выполнении операций с нефтью и нефтепродуктами в акватории морских портов могут действовать ограничения по скорости ветра или высоте волны, установленные обязательными постановлениями в морском порту. При превышении или прогнозе превышения установленных граничных условий, грузовые операции не производятся или останавливаются, что существенно снижает вероятность возникновения аварии и соответствующие риски. В качестве событий, инициирующий возникновение ЧС(Н) для группы сценариев С5, применяются условия возникновения расчётных разливов, установленных требованиями законодательства РФ в области предупреждения и ЛРН на морских акваториях, ВВП и сухопутной территории РФ.

При рассмотрении аварий на нефтяных терминалах и наливных причалах в группе сценариев С5 необходимо предусматривать сценарии аварийной разгерметизации одного из наибольших по вместимости резервуаров, расположенного наиболее близко к водному объекту. Сценарий должен предусматривать квазимгновенное полное разрушение резервуара, перелив нефти и нефтепродуктов через обвалование резервуарного парка и попадание в водный объект. В случае невозможности определения расчётным путём количества нефти и нефтепродуктов, попадающего в водный объект, рекомендуется принимать консервативную оценку: в водный объект попадает весь объем нефти и нефтепродуктов, перелившийся через обвалование резервуарного парка.

Пример результатов идентификации и оценки риска ЧС(Н) первой ступени для нефтяного терминала в морском порту Туапсе приведен в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки риска ЧС(Н) первой ступени для нефтяного терминала в морском порту Туапсе

Наименование объекта	Наименование наиболее неблагоприятного сценария	Расчётный объем разлива, м ³	Частота возникновения ЧС(Н), год ⁻¹
Ответственность: эксплуатирующей организации			
Причал № 1	СЗ-14. Полный разрыв технологического трубопровода	54,6	$5,14 \times 10^{-5}$
Причал № 2	СЗ-24. Разрушение стендера	115,8	$1,10 \times 10^{-4}$
Причал № 3	СЗ-31. Полное разрушение автоцистерны	65,4	$1,10 \times 10^{-5}$
ВПУ № 1	СЗ-41. Частичный разрыв подводного трубопровода	175,4	$1,38 \times 10^{-6}$
Расчётный танкер у причала № 1	СЗ-18. Полный разрыв судового трубопровода	54,6	$2,15 \times 10^{-5}$
Расчётный танкер у причала № 2	СЗ-28. Полный разрыв судового трубопровода	115,8	$1,76 \times 10^{-5}$

Наименование объекта	Наименование наиболее неблагоприятного сценария	Расчётный объём разлива, м ³	Частота возникновения ЧС(Н), год ⁻¹
Расчётный танкер у причала № 3	С3-35. Полный разрыв судового трубопровода	12,7	$1,12 \times 10^{-5}$
Расчётный танкер у ВПУ № 1	С3-45. Полный разрыв судового трубопровода	78,9	$2,08 \times 10^{-5}$
Ответственность: ПДОУ ФПЛРН(М) на объектовом уровне (служба капитана морского порта Туапсе)			
Не выявлено	Не выявлено	-	-
Ответственность: ПДОУ ФПЛРН(М) на региональном уровне (ФГБУ «Администрация морских портов Чёрного моря»)			
ВПУ № 1	С3-45. Полный разрыв подводного трубопровода	516,7	$1,38 \times 10^{-6}$
Расчётный танкер у причала № 1	С4-15. Повреждение днища или борта при навале на причал	612,1	$1,45 \times 10^{-4}$
Расчётный танкер у причала № 2	С4-25. Повреждение днища или борта при навале на причал	554,2	$1,45 \times 10^{-4}$
Расчётный танкер у причала № 3	С4-35. Повреждение днища или борта при навале на причал	117,9	$1,45 \times 10^{-4}$
Расчётный танкер у ВПУ № 1	С4-41. Повреждение борта при столкновении	226,8	$1,45 \times 10^{-4}$
Ответственность: ПДОУ ФПЛРН(М) на федеральном уровне (ФГБУ «Морспасслужба»)			
Расчётный танкер у ВПУ № 1	С5-41. Разлом корпуса на длинной волне с разливом 2-х грузовых танков	17 556	$6,00 \times 10^{-6}$

Примечания:

ПДОУ – постоянно действующий орган управления

ФПЛРН(М) – функциональная подсистема организации работ по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в море с судов и объектов независимо от их ведомственной и национальной принадлежности

Как видно из табл. 2 наибольший объём разлива 17 556 м³ соответствует сценарию «С5-41. Разлом корпуса на длинной волне с разливом 2-х грузовых танков», но частота реализации данного события крайне низка и составляет $6,00 \times 10^{-6}$ год⁻¹. Наименьший объём разлива 12,7 м³ соответствует сценарию «С3-35. Полный разрыв судового трубопровода» с частотой реализации $1,12 \times 10^{-5}$ год⁻¹. Наибольшая частота практической реализации характерна для сценария «С3-24. Разрушение стендера» со значением $1,10 \times 10^{-4}$ год⁻¹ и объемом разлива 115,8 м³.

Заключение

Таким образом, авторами в ходе исследования получены следующие результаты.

1. Разработан алгоритм оценки риска ЧС(Н) с судов и объектов транспортной инфраструктуры.
2. В указанном алгоритме выделен элемент идентификации событий (опасностей).

3. Среди методов идентификации рисков, описанных в работах зарубежных и отечественных ученых, выбран метод «дерева отказов» как наиболее подходящий для тщательного и всестороннего анализа широкого спектра причин сбоев различного характера.

4. Авторами разработаны типовые сценарии аварий для бункеровочных операций; операций по рейдовой перегрузке нефти и нефтепродуктов; для причалов и нефтяных терминалов; при перевозке нефти и нефтепродуктов нефтеналивными судами.

5. Для приведенных сценариев выполнен анализ их причин с применением деревьев отказов, и приведены несколько примеров.

6. Апробированы процедуры идентификации и оценки риска ЧС(Н) первой ступени на примере нефтяного терминала в морском порту Туапсе.

В дальнейшем авторы планируют рассмотреть особенности идентификации событий при авариях сухогрузных судов.

Литература

1. Батанина Е.А., Бородин А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан, Морские интеллектуальные технологии. № 4 part 1, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
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. 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, c. 286-308 (2017)

4. 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*, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-84.
5. 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*, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
6. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; 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*, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
7. Оценка рисков возникновения и последствий разливов нефти в районе Чебоксарского речного порта / А. Е. Пластинин, О. Л. Домнина, В. Н. Захаров, А. М. Сафаров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2019. – Т. 27, № 3. – С. 219-230. – DOI 10.22363/2313-2310-2019-27-3-219-230
8. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, *Ocean & Coastal Management*, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
9. Бородин А.Н. Совершенствование тренажерной подготовки по ликвидации разливов нефти при эксплуатации судов на внутренних водных путях. Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского. 2009. № 9. С. 259-260.
10. Лукина, Е. А. Влияние экологических особенностей различных участков внутренних водных путей на время локализации нефтяных пятен при разливах нефти с судов и объектов внутреннего водного транспорта / Е. А. Лукина, Е. Ю. Чебан, В. Л. Этин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 2(24). – С. 142-151
11. Создание функциональной подсистемы по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на водном транспорте / О. Л. Домнина, А. Е. Пластинин, С. В. Маценко // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 6. – С. 7-14. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-6-7-14
12. Center for Chemical Process Safety CCPS, 2020b. CCPS Monographs: Reflections from Global Process Safety Leaders during and Following Pandemics. Best Practices for Managing Process Safety presented by a select panel of leaders worldwide.
13. Atif Mohammed Ashraf, Wafa Imran, Luc V'echot, Analysis of the impact of a pandemic on the control of the process safety risk in major hazards industries using a Fault Tree Analysis approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74 (2022). 104649. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104649>
14. Latino, M.A., Latino, R.J., Latino, K.C., 2020. Root Cause Analysis Improving Performance for Bottom-Line Results, fifth ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Root%20Cause%20Analysis%20Improving%20Performance%20for%20Bottom-Line%20Results&author=M.A.%20Latino&publication_year=2020
15. Wang, J., 2018. In: Wang, J.B.T.-S.T., CT of, H.-S.T.O. (Eds.), Chapter 11 - Safety Analysis Methods for Train Control Systems. Academic Press, pp. 309–354. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813304-0.00011-6>.

References

1. Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Platinin, Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan, *Marine intellectual technologies*. № 4 part 1, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
2. Olga L. Domnina, Andrey E. Platinin, 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). С. 79-84.3. 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, c. 286-308 (2017)
3. 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, c. 286-308 (2017)
4. 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*, Volume 27 Issue 28, p.35814-35827 (2020) doi:10.1007/s11356-020-09886-84.
5. 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*, Volume 54 Issue 4. p.2112-2121(2020) doi:10.1021/acs.est.9b07086
6. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; 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*, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
7. Platinin A. E. , Domnina O. L., Zakharov V. N., Safarov A. M. Otsenka riskov vozniknoveniya i posledstviy razlivov nefii v rayone Cheboksarskogo rechnogo porta. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2019. T. 27, № 3. S. 219-230. DOI 10.22363/2313-2310-2019-27-3-219-230

8. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, *Ocean & Coastal Management*, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
9. Alexey N. Borodin N. Improving simulator training for oil spill response during the operation of ships on inland waterways. Science and sustainable development of society. *Legacy of V.I. Vernadsky*. 2009. No. 9. S. 259-260.
10. Lukina, E. A., Cheban E. Yu., Etin V. L., The influence of environmental features of various sections of inland waterways on the localization of oil spills during oil spills from ships and inland waterway transport facilities. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2014. № 2(24). P. 142-151
11. Domnina, O.L., Plastinin, A.E., Matsenko, S.V. Development of a functional subsystem to prevent and eliminate consequences of emergencies in water transport. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2024, 2024(6), p. 7–14. DOI 10.24000/0409-2961-2024-6-7-14
12. Center for Chemical Process Safety CCPS, 2020b. CCPS Monographs: Reflections from Global Process Safety Leaders during and Following Pandemics. Best Practices for Managing Process Safety presented by a select panel of leaders worldwide.
13. Atif Mohammed Ashraf, Wafa Imran, Luc V'echot, Analysis of the impact of a pandemic on the control of the process safety risk in major hazards industries using a Fault Tree Analysis approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74 (2022). 104649. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104649>
14. Latino, M.A., Latino, R.J., Latino, K.C., 2020. Root Cause Analysis Improving Performance for Bottom-Line Results, fifth ed. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Root%20Cause%20Analysis%20Improving%20Performance%20for%20Bottom-Line%20Results&author=M.A.%20Latino&publication_year=2020
15. Wang, J., 2018. In: Wang, J.B.T.-S.T., CT of, H.-S.T.O. (Eds.), Chapter 11 - Safety Analysis Methods for Train Control Systems. Academic Press, pp. 309–354. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813304-0.00011-6>.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Домнина Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Пластинин Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: plastinin@yandex.ru

Маценко Сергей Валентинович, доктор технических наук, генеральный директор, АО «Южный морской научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт имени Адмирала Флота Советского Союза И.С. Исакова» (АО «ЮЖНИИМФ»), 353900, г. Новороссийск, ул. Революции 1905 г. / Набережная им. адм. Серебрякова, д. № 1/5, e-mail: msv@ujniimf.ru

Отделкин Николай Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Olga L. Domnina, Ph.D.(Eng), assistant professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, Nesterov str., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Andrey E. Plastinin, Dr. Sci. (Eng), assistant 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: plastinin@yandex.ru

Sergey V. Macenko, Dr. Sci..(Eng), General Director, Southern Marine Scientific Research and Design Institute named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union I.S. Isakov, 353900, Novorossiysk, Revolution St. 1905 / Embankment named after Adm. Serebryakova, D. No. 1/5, e-mail: msv@ujniimf.ru

Nikolay S. Otdelkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Design Theory of Engineering Cooperation of the Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 30.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 10.11.2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Научная статья

УДК 629.5.061

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.063>

Методы повышения точности позиционирования судов на внутренних водных путях

Базылев А.В.¹ ksdrago@yandex.ru, Мельников М.А.¹ mikh.melnickow1999@yandex.ru,

Плющаев В.И.¹ vip3345@yandex.ru, Михеева Т.А.¹ MiheevaTA@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Внедрение элементов концепции безэкипажного судовождения требует реализации сложных алгоритмов управления судном (движение по заданной траектории, расхождение судов, швартовка и пр.). Их разработка диктует необходимость измерения ряда параметров судовых технологических процессов, в том числе координат судна. Существующие глобальные навигационные спутниковые системы позволяют определять координаты с погрешностью в несколько метров. Для решения многих задач судовождения на внутренних водных путях эта величина погрешности является неприемлемой. В данной работе рассмотрена взаимосвязь величины погрешности измерения координат судна с использованием навигационных приборов и качественных показателей процесса управления при удержании судна на заданной траектории при внешних воздействиях. Показана нецелесообразность использования развернутой на внутренних водных путях системы контрольно – корректирующих станций дифференциальной коррекции в судовых системах управления, не позволяющей снизить погрешность позиционирования. Проведена экспериментальная проверка характеристик точности позиционирования навигационных приемников при работе с системами ГЛОНАСС, NavStar, GALILEO и BeiDou в различных сочетаниях в одночастотном и двухчастотном режиме работы. Проведено машинное моделирование динамики судна при отработке алгоритма удержания на заданной траектории, изучена взаимосвязь погрешностей измерения координат и качества процесса управления. Показано, что снижение погрешностей определения координат судна на внутренних водных путях может быть достигнуто использованием мультисистемных и мультисистемных модулей приемников глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: глобальные спутниковые навигационные системы, погрешность позиционирования, алгоритмы управления, судовые технологические процессы, динамические характеристики судна.

Для цитирования: Плющаев В.И., Михеева Т.А., Мельников М.А., Базылев А.В. Методы повышения точности позиционирования судов на внутренних водных путях. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 89—97. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.063

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.063>

Methods for improving the accuracy of vessel positioning on inland waterways

Alexandr V. Bazylev¹ ksdrago@yandex.ru, Mikhail A. Melnikov¹ mikh.melnickow1999@yandex.ru,

Valery I. Plyushchaev¹ vip3345@yandex.ru, Tatiana A. Mikheeva¹ MiheevaTA@yandex

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The introduction of elements of the concept of unmanned navigation requires the development of complex ship control algorithms (movement along a given trajectory, vessel divergence, mooring, etc.). Their development dictates the need to measure a number of parameters of ship technological processes, including the coordinates of the vessel. Existing global navigation satellite systems allow you to determine coordinates with an inaccuracy of several meters. To solve many problems of navigation on inland waterways, this margin of error is unacceptable. In this paper, the relationship between the magnitude of the error in measuring the coordinates of the vessel using navigation instruments and the qualitative indicators of the control process when holding the vessel on a given trajectory under external influences is considered. The inexpediency of using a system of differential correction control stations deployed on inland waterways in shipboard control systems, which does not allow reducing the positioning error, is shown. The experimental verification of the characteristics of the positioning accuracy of navigation receivers when working with GLONASS, NavStar, GALILEO and BeiDou systems in various combinations in single-frequency and dual-frequency operation modes was carried out. A computer simulation of the dynamics of the vessel was carried out while working out the retention algorithm on a given trajectory, the relationship between coordinate measurement errors and the quality of the control process was studied. Reducing errors in determining the coordinates of a vessel on inland waterways can be achieved using multi-frequency and multi-system modules of receivers of global navigation satellite systems.

Key words: global satellite navigation systems, positioning inaccuracy, control algorithms, ship technological processes, dynamic characteristics of the vessel.

For citation: Valery I. Plyushchayev, Tatiana A. Mikheeva, Mikhail A. Melnikov, Alexandr V. Bazylev, Methods for improving the accuracy of vessel positioning on inland waterways. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 89—97. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.063

Введение

Одной из важнейших задач при реализации концепции безэкипажного судовождения является разработка алгоритмов управления судном (движение по траектории, изменение курса, маневрирование при расхождении, швартовые операции и пр.). Штатные авторулевые [1,2], использующие датчики курса и угловой скорости поворота корпуса судна, не в состоянии решить поставленные задачи. Для реализации указанных алгоритмов требуется измерение дополнительных параметров, в частности координат судна.

Для этого можно использовать глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС, NavStar, GALILEO, BeiDou. В настоящее время выпускается широкая номенклатура навигационных приемников, работающих как с одной системой, так и с различными их комбинациями. В источниках указывают разные значения среднеквадратичного отклонения при измерении координат, но в среднем эта величина составляет несколько метров. На рис. 1 представлены результаты измерений погрешности позиционирования с использованием систем ГЛОНАСС и NavStar, полученных авторами с использованием судового приемника «Транзас Т-701» (3600 измерений с интервалом 1 с) [3].

Для практики представляет большой интерес взаимосвязь погрешности используемых приборов для определения координат судна и качественных показателей процесса управления судном при реализации различных алгоритмов, использующих подобные приборы [4].

Любой маршрут можно аппроксимировать набором отрезков, определяемых координатами начальной и конечной точек, т.е. задать набором координат путевых точек. Таким образом, при комплексной автоматизации процесса судовождения одной из значимых задач является создание алгоритма удержания судна на заданной прямолинейной траектории. Алгоритм должен обеспечить движение судна по прямой с минимальным отклонением от нее, даже в условиях внешних воздействий.

Цель статьи – изучить влияние величины погрешности измерения координат судна с использованием ГНСС на качественные показатели процесса управления при удержании судна на заданной траектории при внешних воздействиях.

1. Динамика судна при реализации алгоритма удержания на заданной траектории

В качестве объекта исследования выбрано инновационное судно с колесным движителем – рулевым комплексом проекта ПКС-180 (пассажирские лайнеры «Золотое кольцо» и «Аурум» [5]), математическая модель которого приведена в [6,7]. Габаритные размеры судна составляют 81.6*13.8*9.5 м.

В качестве опорного, был проведен эксперимент, состоящий из трех этапов. На первом этапе судно

разгоняется и выходит на стационарный режим без внешнего воздействия. Затем появляется внешнее воздействие, которое отрабатывается системой управления судна, судно выходит на новый стационарный режим, после чего внешнее воздействие снимается, судно возвращается на первоначальную траекторию.

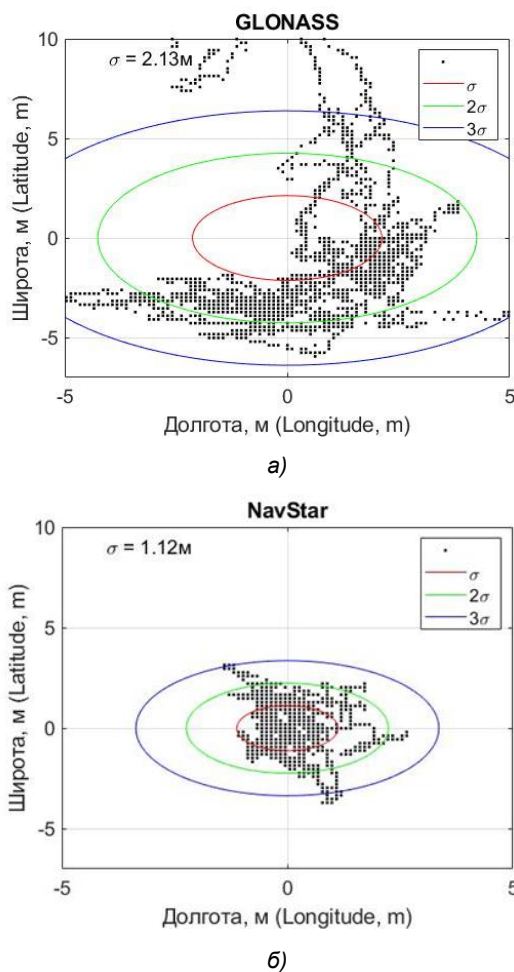


Рис. 1. Определение местоположения с использованием ГНСС ГЛОНАСС (а) и NavStar (б)

На первом этапе при моделировании полагаем, что погрешность используемого прибора ГНСС для определения отклонения от траектории равна нулю.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Судно движется по заданной траектории с некоторым углом дрейфа. Максимальное отклонение Δu от заданной траектории не превышает 1.5 м, частота переключения приводов гребных колес (n_1 и n_2) минимальная.

Для исследования влияния погрешности измерения приемника ГНСС ГЛОНАСС воспользуемся случайной выборкой из полученных в эксперименте данных (рис. 1а) длиной 900 секунд (рис.3). На рис. 3 представлены результаты измерений местоположения прибора (отклонения по

широте ($\Delta\text{Ш}$) и по долготе ($\Delta\text{Д}$) в метрах от средних значений по всей выборке в 3600 точек).

Результаты работы алгоритма удержания судна на заданной траектории при использовании данных, представленных на рис. 3 показаны на рис. 4а (судно следует курсом 0°) и рис. 4б (судно следует курсом 90°).

При использовании приемника ГЛОНАСС для определения координат (массив данных, представленный на рис. 1а) отклонения судна Δy от заданной прямолинейной траектории меняется в пределах $0 \div -14$ м при курсе 0° и в диапазоне $4 \div -2.3$ м при курсе 90° , угол дрейфа α меняется в пределах $2^\circ \div -3^\circ$ для курса 0° и в пределах $1^\circ \div -1.8^\circ$ для курса 90° . В обоих случаях наблюдается недопустимая для практических целей частота переключений приводов гребных колес. В базовом варианте отклонение

судна от заданной траектории не превысило 1.5 м при ветровом воздействии.

Очевидно, полученные результаты неприемлемы для практического использования во многих ситуациях на внутренних водных путях.

Рассмотрим взаимосвязь величины погрешности определения координат и качественных показателей процесса управления. На рис.5 показаны результаты работы алгоритма удержания судна на заданной траектории при использовании данных, представленных экспериментальных данных на рис. 3. На рис. 5а представлены траектории движения судна курсом 00 , рассчитанные для исходного массива ($\Delta\text{Ш}$ на рис. 3), а также для значений отклонений уменьшенных на 50% и 25% от исходных значений (соответственно, кривые $\Delta y=100\%$, $\Delta y=50\%$, $\Delta y=25\%$ на рис. 5а). Траектория $\Delta y=0$ – базовая (погрешность измерений равна 0).

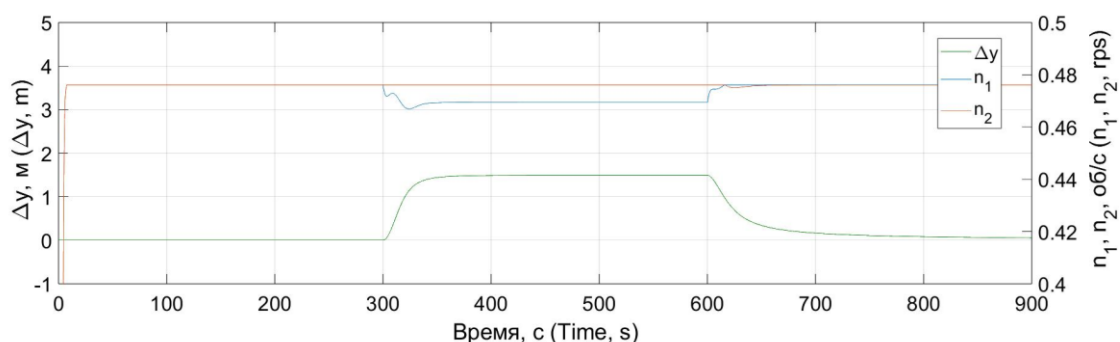


Рис. 2. Траектория движения судна при нулевой погрешности прибора ГНСС

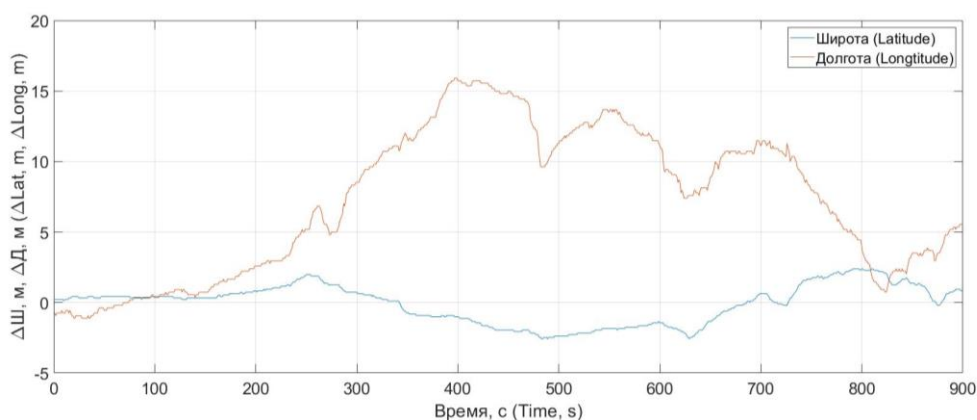
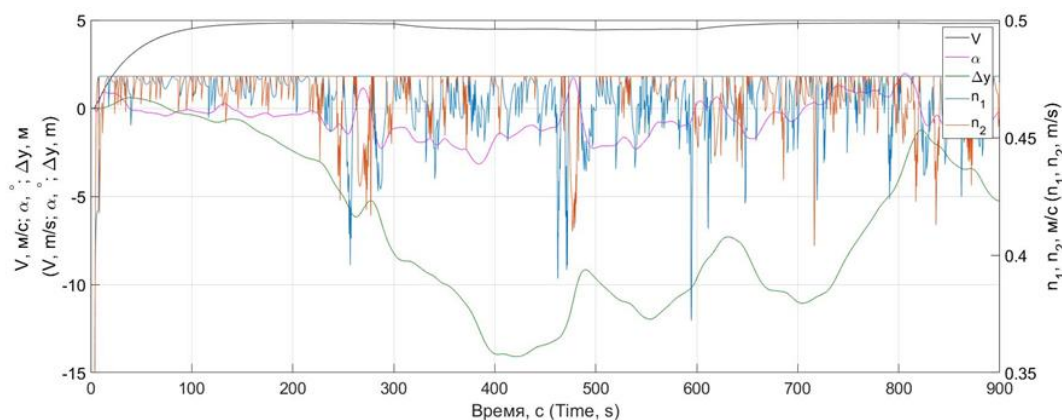
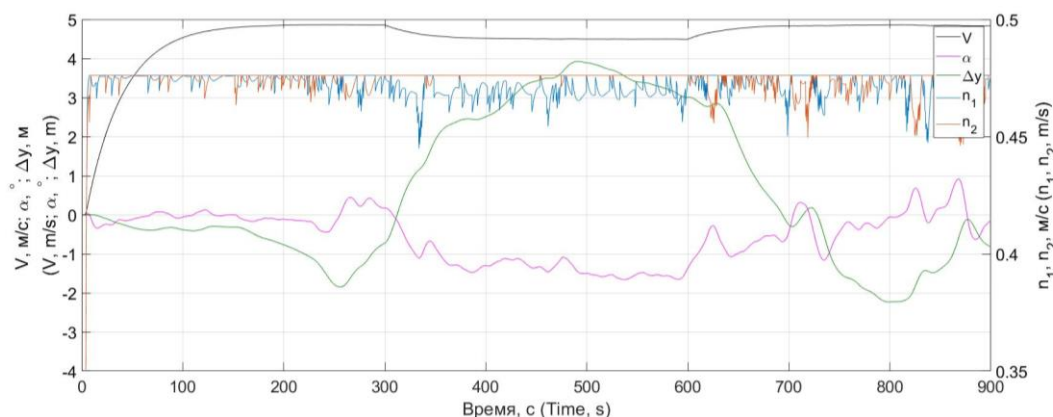


Рис. 3. Погрешности позиционирования по широте и долготе ГНСС ГЛОНАСС



а)



б)

Рис. 4. Результаты работы алгоритма при использовании данных ГНСС ГЛОНАСС

Соответственно, траектории для движения судна курсом 90° показаны на рис. 5б.

При снижении погрешности определения позиции судна существенно снижается величина отклонения судна от заданной прямолинейной траектории (рис. 5). Величина отклонений от заданной траектории пропорциональна погрешности определения координат судна.

2. Повышение точности позиционирования за счет использования дифференциальных подсистем

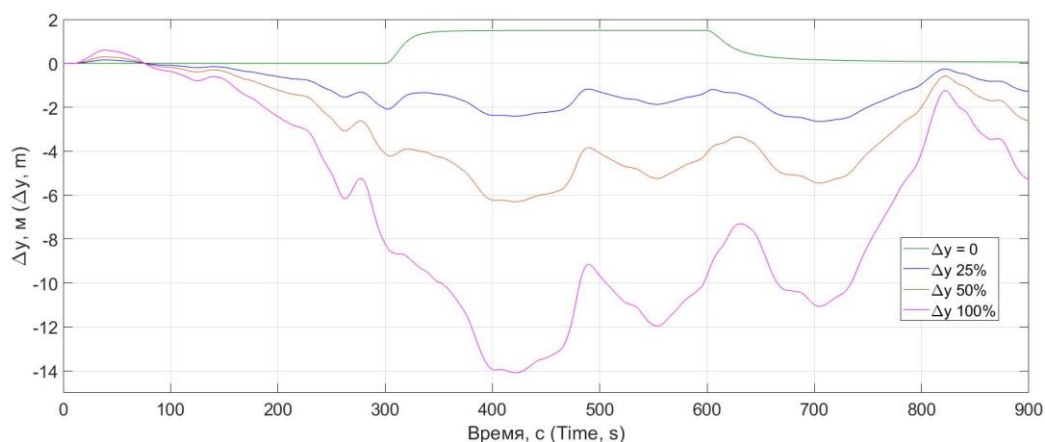
Часто на практике требуется высокая точность местоопределения. К таким задачам можно отнести геодезические измерения, картографию, точную проводку судов по узким фарватерам и маневрирование в акватории порта и пр. Для существенного повышения точности определения координат используются функциональные дополнения к СНС – дифференциальные подсистемы.

В России завершено строительство цепи контрольно-корректирующих станций на Единой глубоководной системе (ЕГС) Европейской части России и на участках рек с развитой

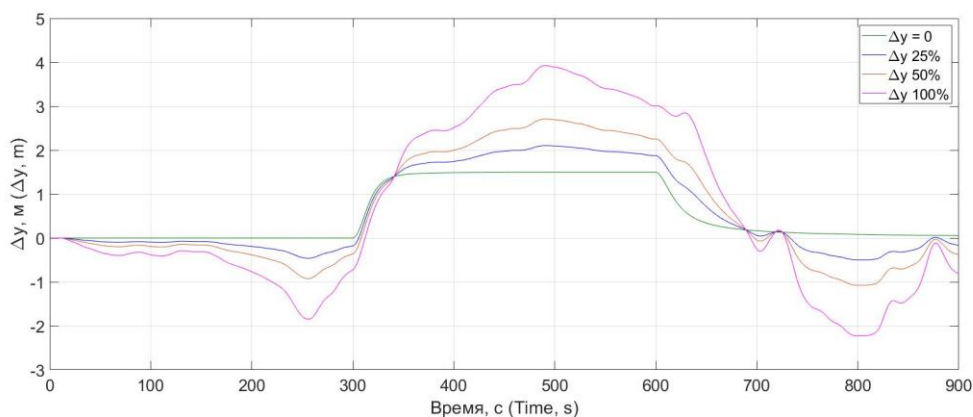
инфраструктурой [8]. Для передачи данных используются два канала передачи данных:

- частоты в диапазоне 283.5-325.0 кГц (для приема дифференциальных поправок на судне требуется специальный приемник);
- канал сети автоматических идентификационных систем (используется штатная судовая АИС).

В стране ведутся работы по созданию полноценной и эффективной информационной системы для внутренних водных путей, реализующей автоматизированный ввод/вывод, обработку, архивирование, анализ, распространение и передачу информации, автоматический обмен информацией между пользователями системы (диспетчерские пункты управления, суда, судовладельцы, службы портов и гидросооружений, государственные органы, бассейновые администрации, коммерческие партнеры). Решение этой задачи позволит в реальном времени формировать базы навигационной обстановки, управленческих решений, грузопотоков и пр., необходимые для анализа и планирования высокоэффективных и безопасных перевозок на ВВП [9]. В частности, в системе предусмотрена передача дифференциальных поправок с контрольно - корректирующих станций (ККС) по каналу АИС.



а)

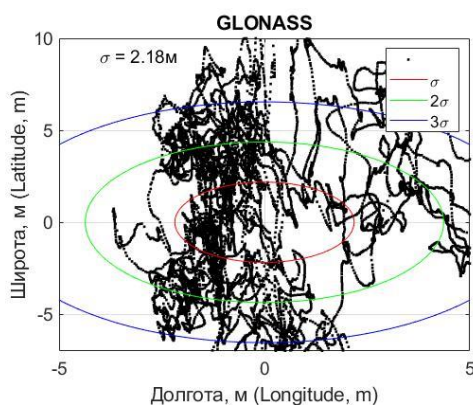


б)

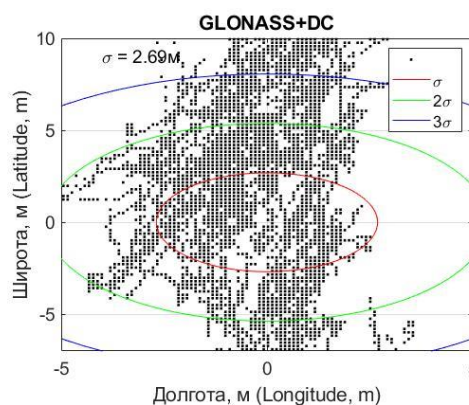
Рис. 5. Влияние погрешности определения координат судна на качественные показатели процесса управления

Согласно ГОСТ Р 56497—2015 «в дифференциальном режиме величины погрешностей определения места (случайная и систематическая погрешности) должны быть в пределах 0,6 м (для $P = 95\%$)» [10]. Однако экспериментальные данные, полученные с помощью судового приемника «Транзас Т-701» при работе с

контрольно-корректирующей станцией ГНСС ГЛОНАСС/GPS в г. Юрьевец не подтверждают это утверждение. На рис. 6 представлены результаты измерений (рис. 6а – работа приемника без дифпоправок, рис. 6б – работа приемника с дифпоправками).



а)



б)

Рис. 6. Определение местоположения с использованием ГНСС ГЛОНАСС (а) и ГНСС ГЛОНАСС с учетом данных дифференциальной коррекции (б)

Таким образом, использование приемника ГЛОНАСС (с дифпоправками или без них) в качестве датчика местоположения не позволяет получить требуемые качественные показатели процесса управления.

3. Использование многорежимных (многосистемных) приемников ГНСС

В настоящее время на рынке присутствует ряд многорежимных (многосистемных) приемников ГНСС, работающих с несколькими функционирующими в настоящий момент ГНСС. Приемник может работать с ГНСС ГЛОНАСС, NavStar, GALILEO, BeiDou (в любом сочетании), а также принимать сигналы SBAS L1 C/A WAAS, EGNOS, MSAS и GAGAN. К ним относится приемник Neo M9N [11]. Производитель заявляет точность местоопределения приемника в 1,5 м (с использованием SBAS) и 2 м (без использования SBAS).

Были проведены исследования погрешности позиционирования приемника Neo M9N при работе с ГНСС ГЛОНАСС, ГЛОНАСС+ NavStar, одновременно с 4 ГНСС. В каждом эксперименте запись результатов измерений проводилась с интервалом 1 с в течении часа одновременно с двух приемников (табл. 1). Первый приемник работал с системой ГЛОНАСС в одночастотном режиме (базовый вариант для сравнения), второй – с различными сочетаниями ГНСС (табл. 1, 1 и 2 строка). Результаты экспериментов также представлены на рис 7 а-б.

Дальнейшее снижение погрешности позиционирования возможно при использовании двухчастотных многорежимных приемников, например OEM модуля Hemisphere Vega 28 [12]. Запись результатов измерений проводилась с интервалом 1 с в течении часа. Одновременно фиксировались данные с OEM модуля Neo M9N при работе с ГНСС ГЛОНАСС (как базовый вариант для сравнения). Результаты приведены в табл.1 - 3 строка) и на рис. 7в.

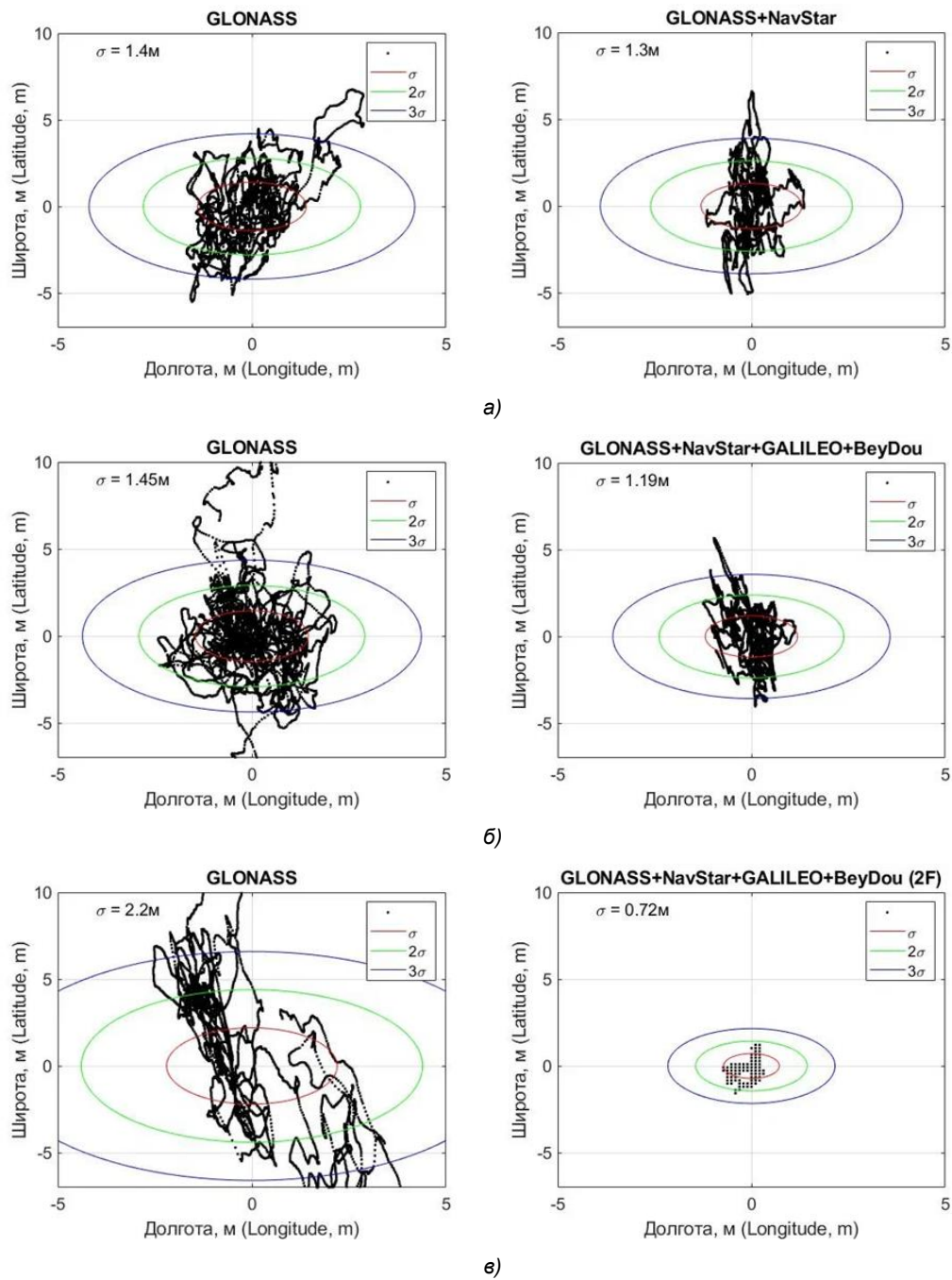


Рис. 7. Погрешность позиционирования: а) ГЛОНАСС и ГЛОНАСС+ NavStar, одночастотный режим; б) ГЛОНАСС и ГЛОНАСС + NavStar + GALILEO + BeiDou, одночастотный режим; в). ГЛОНАСС, одночастотный режим и ГЛОНАСС + NavStar + GALILEO + BeiDou, двухчастотный режим

Таблица 1

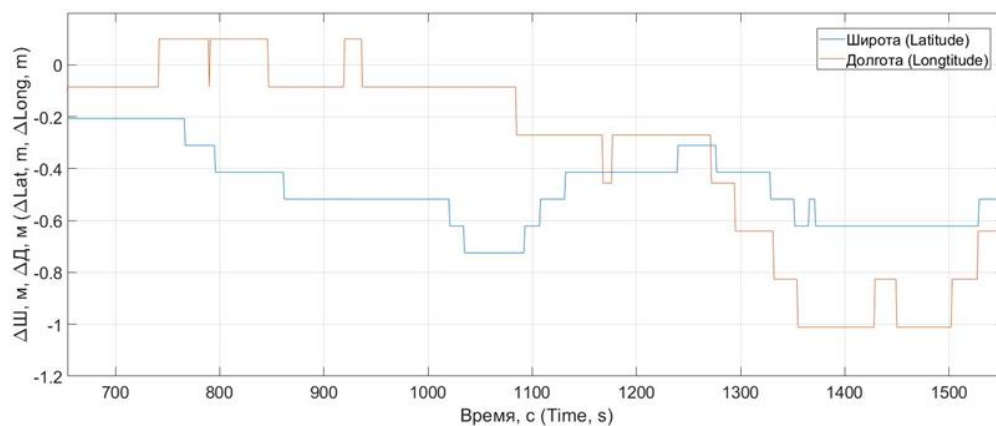
Режимы работы приемников и величины среднеквадратического отклонения для экспериментов

№	Режим первого приемника	Среднеквадратическое отклонение, σ , м	Режим второго приемника	Среднеквадратическое отклонение, σ , м
1	ГЛОНАСС, одночастотный режим	1.4	ГЛОНАСС + NavStar, одночастотный режим	1.3
2		1.45	ГЛОНАСС + NAVSTAR + GALILEO + BeiDou, одночастотный режим	1.19
3		2.2	ГЛОНАСС + NAVSTAR + GALILEO + BeiDou, двухчастотный режим	0.72

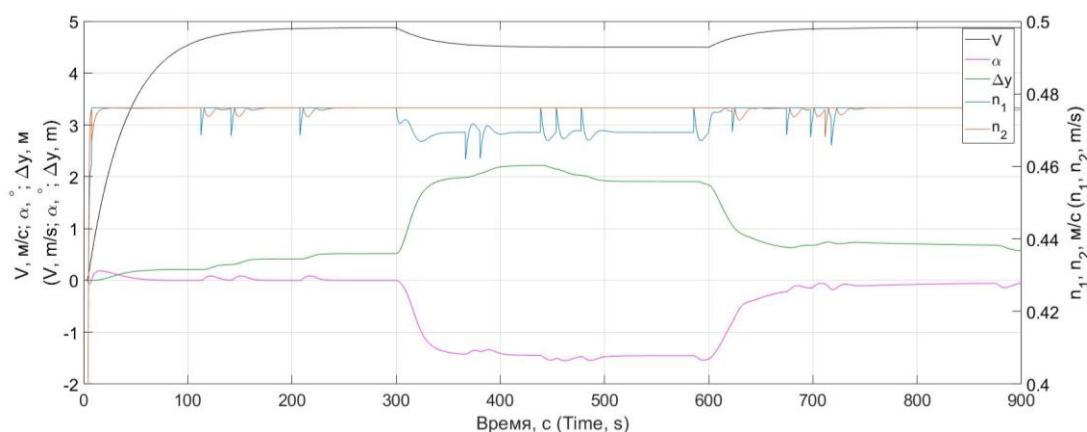
Результаты измерений показывают, что значительного увеличения точности позиционирования можно достигнуть при использовании двухчастотных приемников. Многосистемные приемники при работе на одной частоте существенных преимуществ по сравнению с односистемными приборами не дают.

На рис. 8а представлены результаты измерений местоположения прибора (отклонения по широте

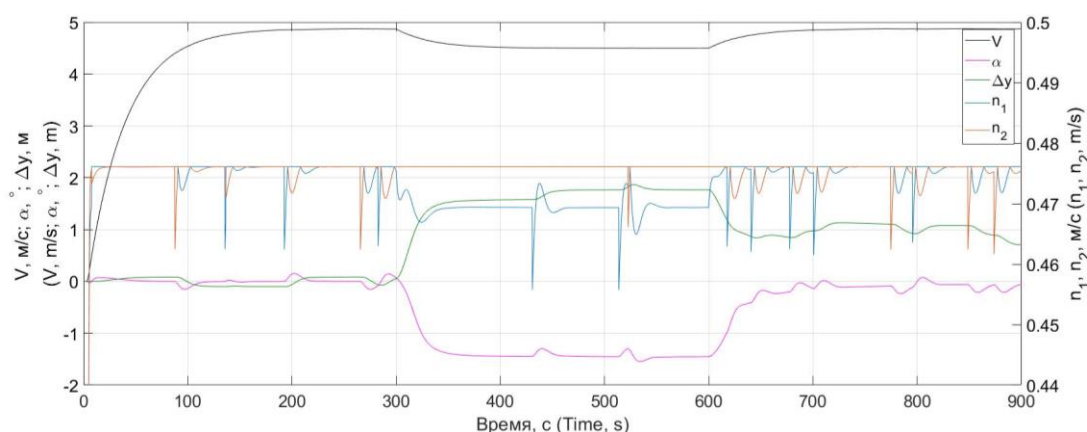
($\Delta\text{Ш}$) и по долготе ($\Delta\text{Д}$) в метрах от средних значений по всей выборке в 3600 точек) для двухчастотного многосистемного режима работы (рис. 7в). Результаты работы алгоритма удержания судна на заданной траектории при использовании данных, представленных на рис. 8а показаны на рис. 8б (судно следует курсом 0°) и рис. 8в и (судно следует курсом 90°).



а)



б)



в)

Рис. 8. Результаты работы алгоритма удержания судна на курсе при использовании двухчастотного многосистемного навигационного приемника: а). погрешности позиционирования приемника по широте и долготе; б) динамика судна при курсе 0° ; в) динамика судна при курсе 90°

Максимальное отклонение от заданной прямолинейной траектории не превышает 2.2 м (лишь на 0.7 м превышает отклонения в базовом варианте при нулевой погрешности измерения местоположения, рис.2). Частота срабатывания приводов гребных колес не превышает 4 раз за 100 с.

Результаты моделирования доказывают, что использование двухчастотного навигационного приемника в качестве датчика положения судна обеспечивает приемлемые для практического использования на внутренних водных путях показатели процесса управления.

4. Обсуждение результатов и выводы

Использование на внутренних водных путях функционального дополнения к ГНСС (локальных дифференциальных систем) для снижения

погрешности позиционирования судов, сталкивается с большими трудностями. Для приема дифференциальных поправок по эфирным каналам в диапазоне частот 283.5-325.0 кГц требуется специализированный судовый приемник. В настоящее время такие приемники не поставляются в Россию.

Возможность передачи дифференциальных поправок по сети АИС, развернутой в Европейской части России, в настоящий момент не реализована.

Альтернативным путем снижения погрешностей определения координат судна на внутренних водных путях может являться использование мультимастовых и мультисистемных модулей ГНСС, обеспечивающих субметровую среднеквадратичную ошибку измерений.

Моделирование доказывает возможность получения приемлемых качественных показателей управления судном при использовании таких приборов для определения координат.

Литература

1. Каминский, В. Ю., Скороходов, Д. А., Маринов, М. Л., Турусов, С. Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением [Текст] / В. Ю. Каминский, Д. А. Скороходов, М. Л. Маринов, С. Н. Турусов // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. — 2019. — № 3 том 3. — С. 64-70.
2. Стельмашук, С. В. Работа рулевого привода в следящем и позиционном режиме [Текст] / С. В. Стельмашук // Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. — 2021. — № 2 том 2. — С. 73-79.
3. Приемоиндикатор «Транзас Т-701». <https://transas.ru/products/tranzas-t-701/?ysclid=m2lufxwy2c542877924>
4. Мельников, М. А. Исследование влияния погрешностей измерения навигационных параметров на качество процесса управления безэкипажным судном / М. А. Мельников, В. И. Плющаев // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 73. — С. 196-205. — DOI 10.37890/jwt.vi73.326.
5. Галкин Д.А. Уникальный туристический теплоход, или как развивать отрасль в современных условиях // Речной транспорт (XXI век). - 2016. - № 2 (78). - С. 21-23.
6. Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Математическая модель судна с колесным движителем — рулевым комплексом «Золотое кольцо». Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. - Астрахань. 2018. №3. С.36-46.
7. Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Динамика судна с колесным движителем-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий. Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies. № 4 Т.2, 2019/№ 4 V.2, 2019, с.139 -146.
8. В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов, И. Г. Кузнецов К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля. Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 2(52). — С. 24-27.
9. Базылев А.В., Кузьмичев И.К., Плющаев В.И. Судовой терминал связи для речной информационной системы. — Транспортное дело России, Москва, №2(165). 2023. С. 239 – 241.
10. ГОСТ Р 56497—2015. Глобальная навигационная спутниковая система. Комплекс оборудования для формирования и передачи дифференциальных поправок сигналов ГНСС по УКВ каналу АИС. Москва, Стандартинформ, 2015
11. GNSS OEM модуль NEO-V9N . https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/1/0/2/NEO-M9N-00B_DataSheet_UBX-19014285.pdf
12. GNSS OEM модуль Hemisphere Vega 28. <https://geospb.ru/oem-gps-moduli-i-chipy/4098-gnss-oem-modul-hemisphere-vega-28.html?ysclid=m2em80mt4z154995695>

References

1. Kaminskiy, V. Yu., Skorokhodov, D. A., Marinov, M. L., Turusov, S. N. Perspektivy sovershenstvovaniya sudovykh sistem upravleniya dvizheniem [Tekst] [Prospects for improving ship traffic management systems [Text]]/ V. Yu. Kaminskiy, D. A. Skorokhodov, M. L. Marinov, S. N. Turusov // Morskie intellektual'nye tekhnologii/Marine intellectual technologies. — 2019. — № 3 том 3. — С. 64-70.
2. Stel'mashchuk, S. V. Rabota rulevogo privoda v sledyashchem i pozitsionnom rezhime [Tekst] [Steering drive operation in tracking and positional mode [Text]] / S. V. Stel'mashchuk // Morskie intellektual'nye tekhnologii/Marine intellectual technologies. — 2021. — № 2 том 2. — С. 73-79.
3. Priemoindikator «Tranzas T-701». [Transas T-701 receiver indicator] <https://transas.ru/products/tranzas-t-701/?ysclid=m2lufxwy2c542877924>
4. Mel'nikov, M. A. Issledovanie vliyaniya pogreshnostej izmerenija navigacionnykh parametrov na kachestvo processa upravleniya bezekipazhnym sudnom [Investigation of influence of navigation parameters measurement errors on the quality of an unmanned vessel control process]/ M. A. Mel'nikov, V. I. Pljushhaev // Nauchnye problemy vodnogo transporta. — 2022. — № 73. — С. 196-205. — DOI 10.37890/jwt.vi73.326.

5. Galkin D.A. Unikal'nyy turisticheckiy teplokhod, ili kak razvivat' otrasl' v sovremennykh usloviyakh [A unique tourist ship, or how to develop the industry in modern conditions] // Rechnoy transport (XXI vek). - 2016. - № 2 (78). - S. 21-23.
6. Bychkov V.Ya. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Matematicheskaya model' sudna s kolesnym dvizhitel'no – rulevym kompleksom «Zolotoe kol'tso». [A mathematical model of a vessel with a wheeled propulsion and steering complex "Zolotoe kol'tso".] Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. - Astrakhan'. 2018. №3. S.36-46.
7. Bychkov V.Ya. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Dinamika sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom v usloviyakh vneshnikh vozdeystviy. [Dynamics of a vessel with a wheeled propulsion and steering complex in conditions of external influences] Morskie intellektual'nye tekhnologii/Marine intellectual technologies. № 4 T.2, 2019/№ 4 V.2, 2019, s.139 -146.
8. V. V. Karetnikov, I. V. Pashchenko, A. I. Sokolov, I. G. Kuznetsov K voprosu postroeniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa parametrov vysokotochnogo navigatsionnogo polya. [On the issue of building an automated system for monitoring the parameters of a high-precision navigation field] Morskaya radioelektronika. – 2015. – № 2(52). – S. 24-27.
9. Bazylev A.V., Kuz'michev I.K., Plyushchaev V.I. Sudovoy terminal svyazi dlya rechnoy informatsionnoy sistemy. [Ship communication terminal for river information system] – Transportnoe delo Rossii, Moskva, №2(165). 2023. S. 239 – 241.
10. GOST R 56497—2015. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Kompleks oborudovaniya dlya formirovaniya i peredachi differentsial'nykh popravok signalov GNSS po UKV kanalu AIS. [GOST R 56497-2015. Global navigation satellite system. A set of equipment for the formation and transmission of differential corrections of GNSS signals via the VHF AIS channel] Moskva, Standartinform, 2015
11. GNSS OEM module NEO-V9N. https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/1/0/2/NEO-M9N-00B_DataSheet_UBX-19014285.pdf
12. GNSS OEM module Hemisphere Vega 28. <https://geospb.ru/oem-gps-moduli-i-chipy/4098-gnss-oem-modul-hemisphere-vega-28.html?ysclid=m2em80mt4z154995695>

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Базылев Александр Владимирович – инженер кафедры радиоэлектроники; Волжский государственный университет водного транспорта; 190121, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: ksdrago@yandex.ru

Alexandr V. Bazylev – Engineer of the Department of Radio Electronics; Volga State University of Water Transport; Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: ksdrago@yandex.ru

Мельников Михаил Алексеевич, аспирант кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта, 190121, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mikh.melnickow1999@yandex.ru

Mikhail A. Melnikov, graduate student of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: mikh.melnickow1999@yandex.ru

Плющаев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vip3345@yandex.ru

Valery I. Plyushchaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vip3345@yandex.ru

Михеева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Ship Design and Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024

Научная статья

УДК 004.91: 53.087.4

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.064>

Проблемы создания судовых электронных журналов

Перевезенцев С.В.¹ kaf_radio@vsuwt.ru, Плющаев В.И.¹ vip3345@yandex.ru,Мизгирев Д.С.¹ mizgirevds@yandex.ru, Матвеев Ю.И.¹ matveevseu@mail.ru,Сугаков В.Г.¹ Sugakov_vg@mail.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В соответствии с нормативной документацией на внутренних водных путях в течении всего срока эксплуатации судна ведется документация на бумажных носителях. Фиксируются технические параметры систем судна, данные о рейсе и судовых мероприятиях, плановых проверках и пр. Автоматизация судового документооборота позволит исключить субъективный человеческий фактор, создавать электронные базы о параметрах судовых технологических процессов, использовать их для анализа и оптимизации работы флота. Показано, что внедрение электронного документооборота целесообразно на судах с высокой степенью автоматизации. Наличие на таких судах датчиков, систем управления отдельными агрегатами и комплексами существенно снижает затраты на создание системы фиксации параметров судовых технологических процессов. В статье рассмотрена техническая реализации процесса сбора первичной информации на судне «Золотое кольцо» для судового электротехнического журнала. Мобильный персональный пульт электромеханика выполнен на базе ноутбука, подключаемого по Wi-Fi к внутренней судовой информационной системе. Помимо параметров, предусмотренных нормативными документами для отображения в судовых журналах, пульт фиксирует множество параметров, характеризующих технологические судовые процессы (в том числе и команды управления механизмами и движительным комплексом судна). При необходимости набор фиксируемых параметров может быть увеличен за счет гибкой архитектуры системы. Наличие такой базы данных может быть использована для анализа протекания технологических процессов в любом интервале времени по интересующему набору параметров, выявления причин чрезвычайных ситуаций, оптимизации режимов работы систем судна и повышению эффективности его эксплуатации и т.п. Сформулированы требования к электронному судовому журналу.

Ключевые слова: Судовой электронный журнал, автоматизация документооборота, судовые системы контроля, информационная база, параметры технологического процесса.

Для цитирования: Перевезенцев С.В., Плющаев В.И., Мизгирев Д.С., Матвеев Ю.И., Сугаков В.Г. Проблемы создания судовых электронных журналов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 98—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.064

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.064>

Problems of creating electronic ship logs

Sergey V. Perevezentsev¹ kaf_radio@vsuwt.ru, Valery I. Plyushchayev¹ vip3345@yandex.ruDmitry S. Mizgirev¹ mizgirevds@yandex.ru, Yuri I. Matveev¹ matveevseu@mail.ru,Valery G. Sygakov¹ Sugakov_vg@mail.ru¹Volga State University of Water Transport

Abstract. In accordance with regulatory documentation on inland waterways, paper documentation is maintained throughout the entire service life of the vessel. Technical parameters of the vessel's systems, data on the voyage and ship activities, scheduled inspections, etc. are recorded. Automation of ship document flow will eliminate the subjective human factor, create electronic databases of ship technological process parameters, and use them to analyze and optimize fleet operations. It is shown that the introduction of electronic document flow is advisable on vessels with a high degree of automation. The presence of sensors, control systems for individual units and complexes on such vessels significantly reduces the costs of creating a system for recording the parameters of ship technological processes. The article discusses the technical implementation of the process of collecting primary information on the Golden Ring vessel for the ship's electrical log. The mobile personal console of the electrician is based on a laptop connected via Wi-Fi to the internal ship information system. In addition to the parameters stipulated by regulatory documents for display in ship logs, the console records many parameters characterizing technological ship processes (including control commands for the ship's mechanisms and propulsion system). If necessary, the set of recorded parameters can be expanded due to the flexible architecture of the system. The presence of such a database can be used to analyze the flow of technological processes in any time interval for a set of parameters of interest, identify the causes of emergency situations, optimize the operating modes of the ship's systems and increase the efficiency of its operation, etc. Requirements for an electronic ship log are formulated.

Key words: Ship's electronic logbook, automation of document flow, ship control systems, information base, technological process parameters.

For citation: Sergey V. Perevezentsev, Valery I. Plyushchayev, Dmitry S. Mizgirev, Yuri I. Matveev, Valery G. Sygakov, Problems of creating electronic ship logs. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 98—106. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.064

Введение

На судах, имеющих право плавания под Государственным флагом Российской Федерации, независимо от формы собственности в течение всего периода его эксплуатации ведется судовая документация на бумажных или электронных носителях (судовой журнал, машинный журнал, электротехнический журнал и др.) [1].

Ведение в ручном режиме судовых журналов является трудоемким процессом и не позволяет исключить человеческий фактор при получении, обработке и фиксации данных. Использование записей журналов для дальнейшего анализа, например, с целью оптимизации технологических процессов следует признать довольно проблематичной (на рис. 1 приведен один из возможных вариантов заполнения журнала). Часть информации (особенно содержащая технические параметры систем судна) дублируется в разных журналах.

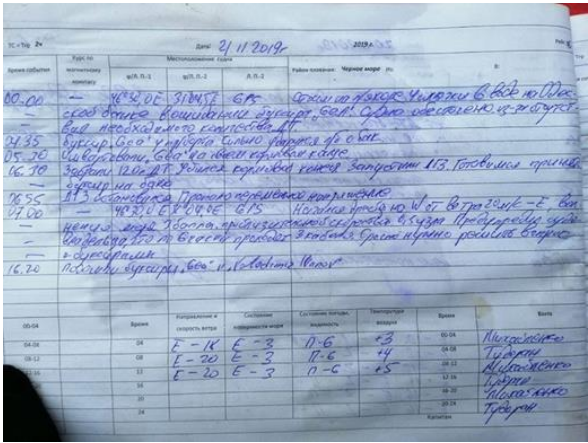


Рис. 1. Вариант заполнения судового журнала

Вахтенный начальник получает и фиксирует в журнале данные от судовых систем контроля параметров (часы, навигационные приборы, панель контроля режимов главных и вспомогательных двигателей, метеостанция и т.д.), данные о рейсе и характере предстоящей работе из диспетчерских бюллетеней, документов о погрузке/разгрузке и пр. В журнал также должна вноситься информация о поведенных тренировках и учениях, о плановых проверках основных агрегатов и комплексов судна, о транспортных происшествиях и пр.

В частности, в судовом журнале требуется заполнить 10 таблиц [1], в которые заносятся более 45 параметров, многие из которых в течении суток могут многократно повторяться (например, время пуска/остановки главных двигателей или метеоданные, фиксируемые каждые 4 часа) или возникать в произвольные моменты времени.

Всю совокупность заносимых в журнал данных можно разделить на 2 группы:

- первая группа – параметры или события, требующие ручного ввода или неоправданных затрат на автоматизацию процесса;
- вторая группа – физические параметры технологических процессов, генерируемые средствами измерения и контроля.

В табл. 1 приведены примеры данных для судового журнала и электротехнического журнала данных из первой группы. Полная автоматизация ввода информации, представленной в таб. 1, невозможна.

Таблица 1

Первая группа	
Судовой журнал	Электротехнический журнал
-выполнение грузовых операций (готовность трюмов грузовых устройств, сведения о грузах, случаи повреждения груза и т.п.); -сведения о смене вахты (время сдачи вахты, место, причины стоянки, сведения об отданном якорю, положение и состояние судна, сведения о плавсредствах у борта и т.п.); -записи о рождении и смерти на судне, об удостоверении завещаний и т.п.; -проведение ежемесячных учений (борьба с пожаром, оставление судна и т.п.); - и другие записи.	-акты проверки состояния электрических средств автоматики и штатного электрооборудования; -протоколы испытаний систем защиты; -графики технического обслуживания судового электрооборудования и средств автоматики; -отчет о проведении технического обслуживания; -замеры сопротивления изоляции электрооборудования; -заявки на ремонтные работы в межнавигационный период; -замеры генераторов и машин ГЭУ до и после среднего ремонта; -работы, выполняемые за сутки; - и другие записи.

Однако отдельные этапы ввода разнообразной информации можно упростить за счет:

- разработки текстовых и цифровых шаблонов для фиксации определенных событий;
- возможности автоматического дублирования отдельных событий с изменением метки времени;
- введение цифровой подписи (смена вахт, капитанский контроль, исправление ошибок и т.п.);
- реализации сигнализации наступивших событиях и необходимости выполнения отдельных операций, предусмотренных планами и графиками.

В табл. 2 приведены примеры данных для судового журнала и электротехнического журнала данных из второй группы.

Ввод информации второй группы и формирование отчетных форм журналов может быть автоматизирован. Сложность заключается в разнообразности типов, конструкции, состава судового оборудования и пр. На судах используется большое количество разнообразных типов датчиков – аналоговых и дискретных, цифровых с различными интерфейсами и протоколами передачи данных и т.п. Необходимо разработать универсальную платформу, позволяющая учитывать конкретный тип судна и его оснащения [2,3].

Очевидно, создавать столь сложную платформу только для ведения судовых электронных журналов (СЭЖ) нецелесообразно. Автоматизация ведения СЭЖ должна быть дополнительным функционалом в

общей судовой системе контроля и управления технологическими процессами.

Таблица 2

Вторая группа	
Судовой журнал	Электротехнический журнал
- работа судна за сутки (номер рейса, пункт остановки, время прибытия; время отправления; число пассажиров/количество грузов; осадка судна); - режим работы главных двигателей (время, частота вращения коленчатого вала, давление масла, температура масла, воды, выхлопных газов); - гидрометеорологические данные (время, ветер, состояние поверхности воды, видимость и т.п.); - навигационные сведения (время, километр водного пути, курс, режим хода и т.п.); - и другие записи.	- режим работы генераторов судовой электростанции (мощность, ток, сопротивление изоляции); - режим работы гребной установки (ток, напряжение, температура генератора, температура двигателя, обороты двигателя, сопротивление изоляции); - число часов работы за сутки судовой электростанции и гребной установки; - и другие записи.

Цель статьи – обосновать подходы к реализации судовых электронных журналов

Техническая реализации процесса сбора первичной информации

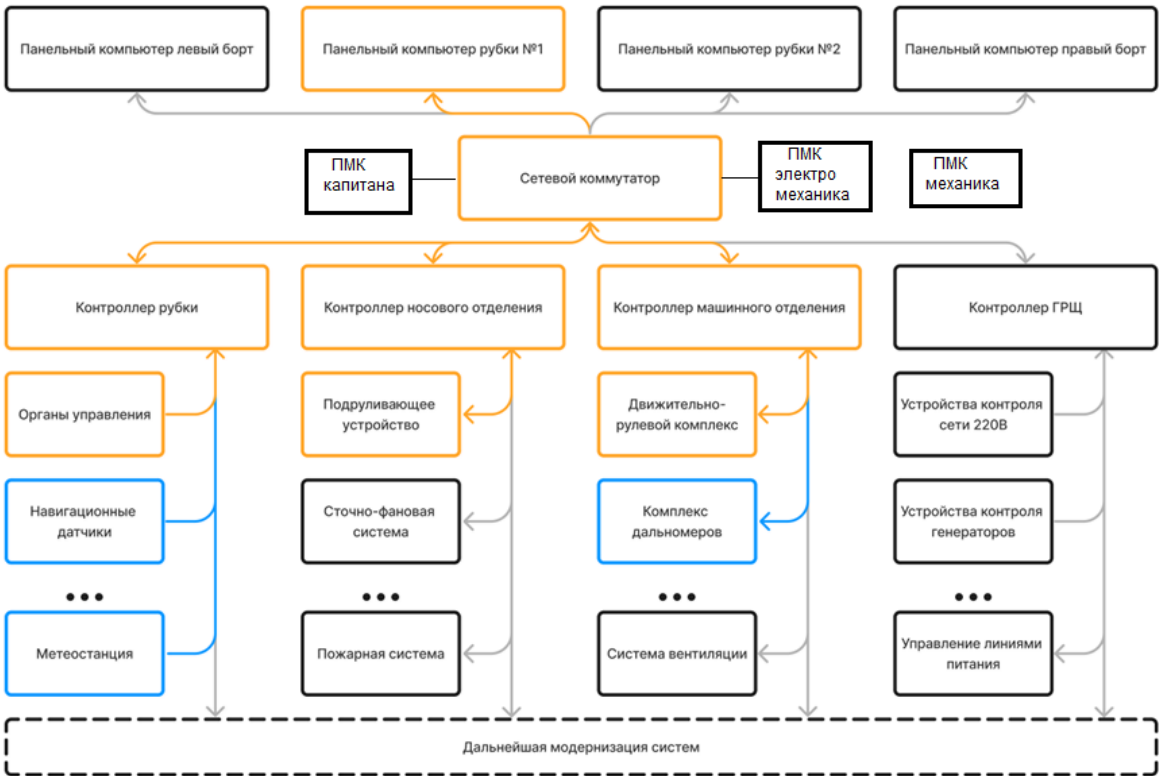


Рис. 2. Компьютеризированная система контроля и управления технологическими процессами судна

Экономически и функционально целесообразно создавать системы контроля и управления по иерархическому принципу [4].

В настоящее время производится широкая номенклатура контроллеров позволяющих обрабатывать большое количество сигналов первичных датчиков с различными типами выходных сигналов (ток, напряжение, цифровой сигнал).

Контроллеры размещаются рядом с агрегатами и механизмами судна, оснащенных первичными датчиками. Каждый контроллер производит первичную обработку сигналов, обработанные данные отправляются по судовой сети в центральный пост управления, где, в частности, формируется электронная информационная база, в том числе и в виде электронных судовых журналов. Такой подход существенно сокращает число кабелей для передачи информации и затраты на монтаж кабельных линий, позволяет легко масштабировать систему, упрощает процесс наладки как приборных компонентов, так и программного обеспечения и пр.

По такому принципу была создана компьютеризированная система контроля и управления технологическими процессами судна КС КУТПС [5]. В настоящее время КС КУТПС установлена на двух колесных пассажирских лайнерах «Золотое кольцо» и «Аурум» [6]. Теплоход «Золотое кольцо» был выбран в качестве базового для проведения работ по созданию СЭЖ. Структура системы приведена на рис. 2.

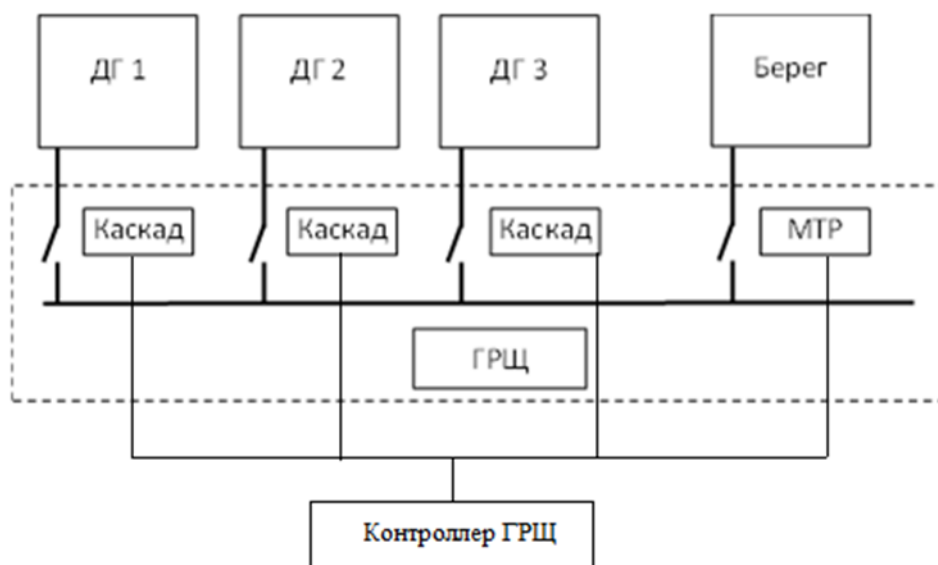


Рис. 3. Контроль энергетической установки теплохода «Золотое кольцо»

Одной из функций контроллеров носового и машинного отделений, контроллера рубки, контроллера главного распределительного щита является считывание и предварительная обработка информации с первичных датчиков систем и агрегатов судна. Информацию с датчиков контроллеры передают по внутренней локальной сети Ethernet на два центральных компьютера №1 и №2 в ходовой рубке. На компьютеры также поступает информация с навигационных приборов, метеостанции, органов управления. Программное обеспечение компьютеров использует полученные данные для реализации различных алгоритмов: управления движительно-рулевым комплексом, контроля состояния и режимов функционирования отдельных судовых комплексов, дистанционного управления агрегатами судна и т.п. КС КУТПС дополнена персональными мобильными пультами контроля ПМПК (на базе ноутбука) капитана, механика и электромеханика. Пульты подключены к внутренней сети Ethernet и обеспечивают оперативной информацией командный состав судна в касающейся их части в любой точке судна.

В качестве примера на рис. 3 представлена структура подсистемы контроля электрических параметров судовой энергетической установки теплохода «Золотое кольцо», включающей в свой состав 3 дизель - генератора ДГ1 – ДГ3 (также предусмотрена возможность питания с берега) [5].

Распределенная иерархическая подсистема контроля технологических параметров имеет открытую архитектуру, позволяющую легко расширять ее функциональные возможности.

В ГРЩ установлены контроллеры нижнего уровня «Каскад-М», состоящие из блока контроллера и блока индикации К2600 (рис. 4). Контроллеры «Каскад-М» позволяют управлять дизель – генераторами и контролировать их работу.

Контроллер «Каскад – М» связан с контроллером следующего уровня по шине RS- 485 (протокол MODBUS). Функции контроллера «Каскад – М» []:

- подключение (отключение) дизель – генератора на шину;

- защита дизель - генератора от перегрузки;
- измерение параметров электрической сети (напряжение и ток каждой фазы генератора, активная и реактивная мощность, частота сети). Эти данные фиксируются в архиве системы управления.



Рис. 4. Блок контроллера и блок индикации

«Каскад – М»

Параметры судовой сети при питании от берегового источника измеряются прибором МТР -3 (рис. 5а), передающий параметры сети во внутрисудовую информационную сеть. Контроль судовой сети 220 В производится модулем измерения параметров электрической сети МЭ110 (рис. 5б). Модуль МЭ110 обеспечивает измерение токов и напряжений по фазам трехфазной сети 220 В переменного тока, потребляемые активную и реактивную мощность, частоту сети.



а).



б).

Рис. 5. Приборы измерения электрических параметров судовой сети

Распределенная иерархическая подсистема контроля технологических параметров имеет открытую архитектуру, позволяющую легко расширять ее функциональные возможности. Другие подсистемы КС КУТПС построены по такому же принципу.

Реализация судовых электронных журналов

Помимо параметров, предусмотренных нормативными документами для отображения в судовых журналах, КС КУТПС фиксирует множество параметров, характеризующих технологические судовые процессы (в том числе и команды управления механизмами и движительным комплексом судна). При необходимости набор фиксируемых параметров может быть увеличен за счет гибкой архитектуры системы. На рис. 6 представлен фрагмент получаемого центральными компьютерами №1 и №2 массива данных (с интервалом в 1 с, каждую секунду фиксируется в настоящий момент 142 параметра).

```
20:26:34: ДГ1_P1={198,500000{F1={49,630001{ U1={406,031
{0,000000{y_mag{0,000000{z_mag{0,000000{Давл{0,000000{ и т.п.
20:26:35: ДГ1_P1={195,600006{F1={49,299999{ U1={408,97
{0,000000{y_mag{0,000000{z_mag{0,000000{Давл{0,000000{
20:26:36: ДГ1_P1={205,199997{F1={49,279999{ U1={403,954
```

Рис. 6. Массив данных получаемых КС КУТПС

Часть данных может быть использована для заполнения СЭЖ. Страницы электронного электротехнического журнала (ЭЭЖ) в навигацию 2024 г. на теплоходе «Золотое кольцо» интегрированы в персональный мобильный пульт контроля (ПМПК) электромеханика. Экранная форма электронного электротехнического журнала показана на рис. 7.

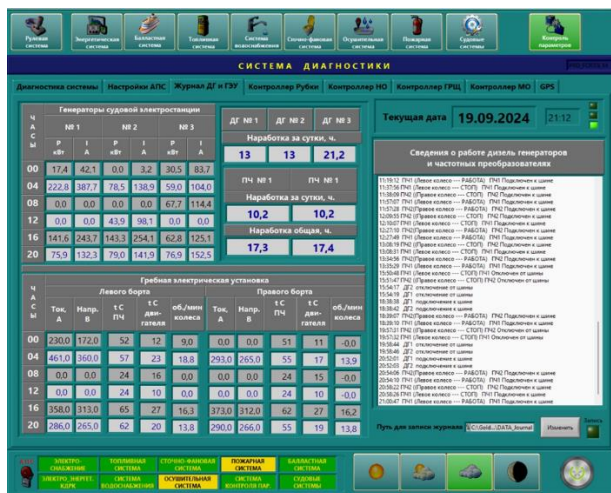


Рис. 7. Экранная форма электронного электротехнического журнала

На экране отображается следующая информация:

- мощность (P кВт) и токи (I_a) трех генераторов судовой электростанции (№1-3), автоматически зафиксированные в 0, 4, 8, 12, 16 и 20 часов судового времени;

- параметры трех дизель-генераторов ДГ №1 – ДГ №3 (наработка за сутки, часов);

- параметры преобразователей частоты ПЧ №1 и ПЧ №2 (наработка за сутки и общая наработка, часов);

- параметры гребных установок левого и правого борта (ток, напряжение, температура частотного привода, температура электродвигателя привода, обороты гребных колес) в 0, 4, 8, 12, 16 и 20 часов судового времени;

- журнал событий о работе дизель-генераторов и частотных преобразователях.

Раз в сутки происходит сохранение данных в архив ПМПК, что позволяет анализировать качество функционирования агрегатов судна за любой промежуток времени. Пример отображения архивных данных представлен на рис. 8.

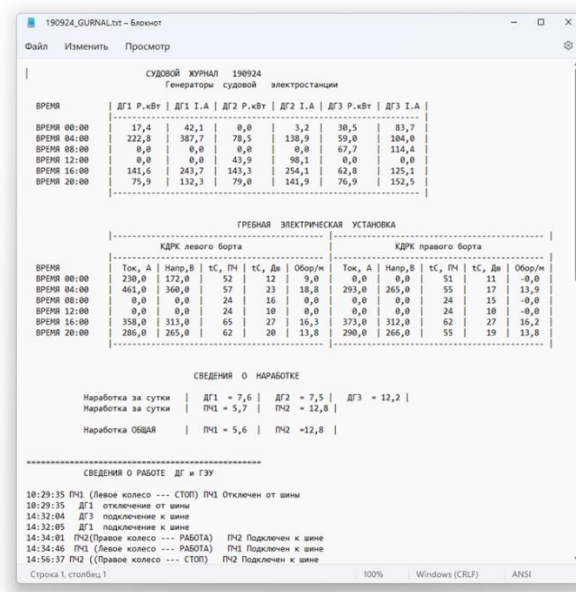


Рис. 8. Архивные данные

В связи с конструктивными отличиями судов и их комплектации различным оборудованием экранные формы и архивы будут иметь различную форму и содержание.

Подключение ПМПК по Wi-Fi к внутренней судовой информационной системе позволяет непрерывно обновлять информацию ЭЭЖ. Выключение ПМПК ведет к потере текущей информации на время выключения. На рис. 9 продемонстрированы пропуски в фиксации информации на время выключения ПМПК (в 4 и 8 часов).

Генераторы судовой электростанции									
ЧАС	№ 1			№ 2			№ 3		
	Р кВт	А	Т	Р кВт	А	Т	Р кВт	А	Т
00	17,4	42,1	0,0	3,2	30,5	83,7			
04									
08									
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
16	141,6	243,7	143,3	254,1	62,8	125,1			
20	75,9	132,3	79,0	141,9	76,9	152,5			
ДГ № 1 ДГ № 2 ДГ № 3									
Наработка за сутки, ч.									
	0,3	0,3	0,3						
ПЧ № 1 ПЧ № 1									
Наработка за сутки, ч.									
	0,2	0,2							
Наработка общая, ч.									
	7,3	7,3							

Гребная электрическая установка									
ЧАС	Левый борт					Правый борт			
	Ток, А	Напр., В	Т.С. ПЧ	Т.С. Двигателя	об./мин колеса	Ток, А	Напр., В	Т.С. ПЧ	Т.С. Двигателя
00	230,0	172,0	52	12	9,0	0,0	0,0	51	11
04									
08									
12	0,0	0,0	24	10	0,0	0,0	0,0	24	10
16	358,0	313,0	65	27	16,3	373,0	312,0	62	27
20	286,0	265,0	62	20	13,8	290,0	266,0	55	19

Рис. 9. Пропуск фиксации информации в ПМПК

Для исключения подобных ситуаций программа СЭЖ, наряду с ПМПК капитана и главных судовых специалистов, устанавливается в специальном терминале (АРМ СУДНО), разработанным во ВГУВТ (прошло опытную эксплуатацию на теплоходе «Петр Андрианов» в навигации 2023 -2024 г.). АРМ СУДНО работает непрерывно в течении навигации, что не будет приводить к сбоям в фиксации информации [7,8].

АРМ СУДНО (рис. 10) включает в свой состав судовую АИС (1), промышленный компьютер (2), модуль GPRS, блок питания и принтер (3).

АРМ СУДНО позволяет:

- принимать, архивировать, распечатывать все сообщения диспетчерских служб и АРМ СУДНО других судов;
- формировать, редактировать, архивировать и осуществлять передачу сообщений о повреждении, неисправности или отсутствии знаков навигационного ограждения, сообщений о транспортных происшествиях, сообщений о загрязнении водной среды, сообщений по эпидемиологической обстановке, сообщений об установленных судну ограничениях по ветро-волновому режиму и ледовым условиям, запросов разрешений на продолжения движения, докладов о прохождении участков «О» или «М», сообщений о чрезвычайных ситуациях в адресном режиме;
- формировать, редактировать, архивировать и осуществлять передачу сообщений на АРМ СУДНО других судов в адресном формате.

Функционал АРМ СУДНО позволяет интегрировать в его состав электронные журналы. АРМ СУДНО, наряду с архивацией, обеспечивает по запросу передачу информации о параметрах технологических процессов (содержимом СЭЖ) на сервер диспетчера Администрации бассейна по сети Интернет или по каналам АИС. Эта информация может быть передана далее судовладельцам по их запросам.

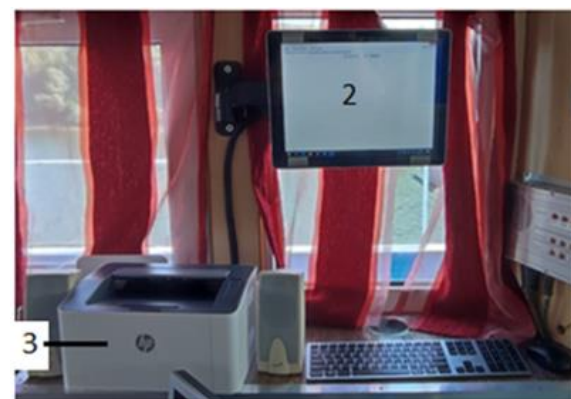


Рис. 10. АРМ СУДНО на теплоходе «Петр Андрианов»

Расширение информационной базы электронных журналов

Требованиями [1] определен круг параметров, подлежащих фиксации в судовых журналах. На судах с высокой степенью автоматизации системы управления и контроля оперируют с гораздо большим числом данных. Эти данные отражают не только состояние агрегатов и механизмов судна, но и процессы формирования и исполнения управляющих воздействий, генерируемых судоводителем или самой системой управления. На рис. 11 приведены примеры частичной «расшифровки» массива данных получаемых КС КУТПС судна «Золотое кольцо» (рис. 6). В табл. а показаны параметры работы трех дизель – генераторов, в таблице б – параметры двух частотных приводов гребных колес. Наличие такой базы данных может быть использована для анализа протекания технологических процессов в любом интервале времени по интересующему набору параметров. На рис. 12 представлен вариант анализа движения судна (положения джойстиков

управления, скорость судна, управляющие сигналы электродвигателей гребных колес) на заданном участке.

А1	Время	ДГ1_P1=	F1=	U1=	I1=	ДГ1_P2=	F2=	U2=	I2=	ДГ1_P3=	F3=	U3=	I3=
1	20:26:34	198,5	49,63	406,031	372,8	181	50,22	400,668	306,4	48,9	50,22	399,457	92
2	20:26:35	195,6	49,3	408,972	366,4	180,7	50,32	405,858	304,8	43,4	50,29	401,014	80,8
3	20:26:36	205,2	49,28	403,955	388	186,5	50,22	405,858	311,2	43,6	50,25	400,495	81,6
4	20:26:37	198	53,45	406,55	375,2	191,7	50,18	403,263	317,6	43,9	50,25	400,668	82,4
5	20:26:38	191,4	49,79	407,588	356,8	160,6	50,27	406,204	264,8	44,4	50,27	400,668	83,2
6	20:26:39	194,1	49,54	406,204	363,2	125,7	50,25	410,875	206,4	45	50,25	400,668	84
7	20:26:40	191,6	54,12	408,972	356	97,9	50,2	406,55	161,6	47,2	50,18	400,149	86,4
8	20:26:41	198,4	53,8	406,55	372,8	104,4	50,2	404,647	177,6	46,7	50,2	400,149	85,6
9	20:26:42	191,6	49,95	409,145	356,8	106,2	50,22	404,128	179,2	46,9	50,25	400,322	85,6
10	20:26:43	204,6	49,58	403,955	387,2	106,9	50,29	402,744	177,6	46,5	50,22	400,495	85,6
11	20:26:44	198,3	53,63	407,069	373,6	106,9	50,22	400,495	180	45	50,29	400,668	83,2
12	20:26:45	196,6	53,63	405,512	370,4	104,5	50,22	403,09	176	43,9	50,27	401,187	81,6
13	20:26:46	194,5	54,39	407,934	363,2	106,2	50,22	401,533	180,8	43,5	50,2	400,841	81,6

а).

A1	Время																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	Время	ГП1_n1=	M1=	I1=	F1=	w1=	P1=	t%D1=	t%ГП1=	код1=	ГП2_n2=	M2=	I2=	F2=	w2=	P2=	t%D2=	t%ГП2=	код2=
1	20:26:34	18,75	64,9	409	45	900	59	33	77	4	18,29167	59,7	397	43,9	878	51	34	67	5
3	20:26:35	18,75	64,2	407	45	901	58	33	77	4	18,66667	62,2	405	44,8	896	55	34	67	4
4	20:26:36	18,75	64,6	409	45	900	58	33	77	4	18,70833	62,8	406	44,9	898	56	34	67	4
5	20:26:37	18,75	64,8	409	45	899	58	33	77	4	18,75	62,2	398	45	900	56	34	67	6
6	20:26:38	18,70833	64,7	411	44,9	898	58	33	77	4	17,91667	56,4	365	43	866	50	34	67	6
7	20:26:39	18,70833	64,5	407	44,9	898	58	33	77	4	16,79167	48,9	318	40,3	819	42	34	67	6
8	20:26:40	18,70833	65	413	44,9	899	59	33	77	4	15,83333	42	297	38	755	34	34	67	6
9	20:26:41	18,66667	65,6	417	44,8	897	59	33	77	4	15,625	42,7	313	37,5	753	33	34	67	4
10	20:26:42	18,70833	65,2	414	44,9	899	59	34	77	4	15,625	42,6	313	37,5	753	32	34	67	4
11	20:26:43	18,70833	65,4	416	44,9	898	59	34	77	4	15,625	41,5	306	37,5	749	31	34	67	4
12	20:26:44	18,79167	64,7	407	45,1	901	58	34	77	4	15,58333	41,8	310	37,4	749	31	34	67	4
13	20:26:45	18,75	63,9	402	45	899	58	34	77	4	15,66667	41,8	309	37,6	751	31	34	67	4
14	20:26:46	18,70833	64,5	411	44,9	897	58	34	77	4	15,625	41	306	37,5	751	31	33	67	5

б).

Рис. 11. Часть архива данных КС КУТПС: а - параметры работы трех дизель –генераторов; б - параметры двух частотных приводов гребных колес

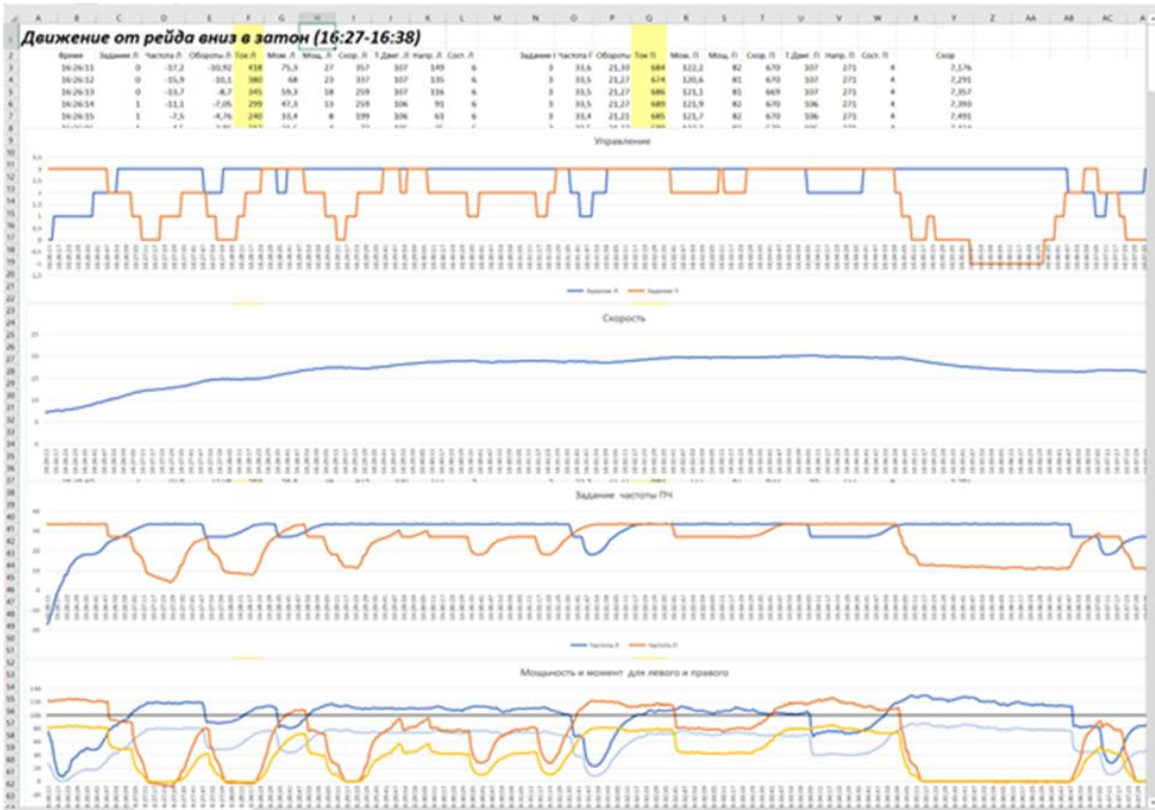


Рис. 12. Анализ параметров движения судна

Всестороннего анализ хода судовых технологических процессов на основе данных СЭЖ предоставляет широкие возможности:

- по выявлению причин чрезвычайных ситуациях;
- анализу причин возникновения нештатных ситуаций как в результате действий персонала, так и по техническим причинам;
- по оптимизации режимов работы систем судна и повышению эффективности его эксплуатации и т.п.

Данный пример показывает, что простой перевод утвержденной формы судового журнала [] в электронный вид нецелесообразен. Электронная фиксация второй группы параметров (физических параметров технологических процессов) требует больших затрат и не дает возможности провести полноценный анализ работоспособности оборудования судна и разработать меры по повышению эффективности его эксплуатации.

В связи с разнообразием типов судов и их оборудования можно сформулировать некоторые требования к СЭЖ.

Во-первых, СЭЖ должен иметь открытую архитектуру. Для обязательной фиксации необходимо утвердить ограниченный список универсальных интегральных параметров. Список других параметров является индивидуальным для каждого судна и определяется спецификой судна.

Во-вторых, СЭЖ должен реализовывать визуализацию просмотра выбранного набора параметров за выбранный промежуток времени, формирование отчетных форм в соответствии с заданными шаблонами.

В-третьих, СЭЖ должен обеспечивать возможность передачи части информации выбранной в соответствии с запросом диспетчера

Администрации бассейна, судовладельца или государственных органов. Реализация дистанционного доступа к ЭСЖ позволит интегрировать судовую документацию с действующими системами учета Администраций бассейнов.

В-четвертых, программное обеспечение СЭЖ устанавливается в специализированном судовом терминале. Терминал обеспечивает получение данных по внутрисудовой сети и обеспечивает передачу информации на берег по каналам АИС и сети интернет (должны быть решены вопросы защиты внутрисудовой сети от внешних воздействий).

В пятых, для реализации фиксации части информации первой группы в ЭСЖ должны присутствовать шаблоны для фиксации определенных событий, механизм автоматического дублирования отдельных событий с изменением метки времени, возможность цифровой подписи, сигнализация наступивших событиях и пр.

Выводы

Введение электронного судового документооборота целесообразно только на судах с высокой степенью автоматизации. Внедрение электронных судовых журналов оправдано на судах с высокой степенью автоматизации, оборудованных комплексом датчиков, локальных систем контроля и управления, сигнализации и т.п. Переоборудование судов малой степени автоматизации для реализации процесса сбора первичной информации (установка комплекта датчиков, монтаж кабельных линий) является очень затратным мероприятием.

Литература

1. «Об установлении правил ведения судового журнала и машинного журнала (для судна с механическим двигателем, эксплуатируемого членами экипажа судна без совмещения должностей)». Приказ Министерства транспорта РФ от 27 октября 2022 г. № 435.
2. Плющаев В.И., Перевезенцев С.В., Безруков Е. Цифровизация судовых технологических процессов передачи и обработки информации. Транспортное дело России, Москва, №1(170). 2024. С. 213.
3. Титов А.В., Баракат, Чанчиков В.А., Тактаров Г.А., Ковалев О.Л. Системы управления безэкипажными судами. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-4(43), С.109-120.
4. Галкин Д.Н., Итальянцев С.А., Плющаев В.И. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом. Речной транспорт (XXI век). Москва. № 6. 2014 – с.29-31
5. Бурда Е.М., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И. Комплексная автоматизация технологических процессов колесных судов. Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4 Т.1. С.180 - 182.
6. Галкин Д. Н. и др., Уникальный туристический теплоход, или как развивать отрасль в современных условиях. Речной транспорт (XXI век), 2016. № 2 (78). С. 21-23.
7. Bazylev A., Plyushchayev V. Digital information system for inland water transport vessels based on AIS Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032031. doi:10.1088/1742-6596/2131/3/032031.
8. Базылев А.В., Кузьмичев И.К., Плющаев В.И. Судовой терминал связи для речной информационной системы. Транспортное дело России, Москва, №2(165). 2023. С. 239 – 241.

References

1. «Ob ustanovlenii pravil vedeniya sudovogo zhurnala i mashinnogo zhurnala (dlya sudna s mekhanicheskim dvigatelem, ekspluatiruemogo chlenami ekipazha sudna bez sovmeshcheniya dolzhnostey)»["On the establishment of rules for maintaining a ship's logbook and an engine log (for a vessel with a mechanical engine, operated by members of the vessel's crew without combining positions)."] J. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 27 oktyabrya 2022 g. № 435.
2. Plyushchayev V.I., Perevezentsev S.V., Bezrukov E. Tsifrovizatsiya sudovykh tekhnologicheskikh protsessov peredachi i obrabotki informatsii [Digitalization of ship technological processes for the transmission and processing of information]. Transportnoe delo Rossii, Moskva, №1(170). 2024. S. 213.
3. Titov A.V., Barakat, Chanchikov V.A., Taktarov G.A., Kovalev O.L. Sistemy upravleniya bezekipazhnyimi sudami. [Unmanned Vessel Control Systems]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2019, №1-4(43), S.109-120.

4. Galkin D.N., Ital'yantsev S.A., Plyushchaev V.I. Komp'yuterizovannaya sistema upravleniya passazhirskim kolesnym teplokhodom [Computerized control system for a passenger paddle steamer]. Rechnoy transport (XXI vek). Moskva. № 6. 2014. s.29-31.
5. Burda E.M., Perevezentsev S.V., Plyushchaev V.I. Kompleksnaya avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov kolesnykh sudov [Integrated automation of technological processes of wheeled ships]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2021. № 4 Т.1. S.180 - 182.
6. Galkin D.A. Unikal'nyy turisticheskiy teplokhod, ili kak razvivat' otrasl' v sovremennykh usloviyakh [A unique tourist ship, or how to develop the industry in modern conditions]. Rechnoy transport (XXI vek). 2016. № 2 (78). S. 21-23.
7. Bazylev A., Plyushchaev V. Digital information system for inland water transport vessels based on AIS Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032031. doi:10.1088/1742-6596/2131/3/032031.
8. Bazylev A.V., Kuz'michev I.K., Plyushchaev V.I. Sudovoy terminal svyazi dlya rechnoy informatsionnoy sistemy. [Ship communication terminal for river information system]. Transportnoe delo Rossii, Moskva, №2(165). 2023. S. 239 – 241

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Плющаев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vip3345@yandex.ru

Перевезенцев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5. e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Мизгирев Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Матвеев Юрий Иванович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация судовых энергетических установок», Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveevseu@mail.ru

Сугаков Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: Sugakov_vg@mail.ru

Valery I. Plyushchaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: vip3345@yandex.ru

Sergey V. Perevezentsev, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Radio Electronics, Volga state university for water transport, Nesterova 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Dmitriy S. Mizgirev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine repair, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: mizgirevds@yandex.ru

Yuri I. Matveev Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Operation of Marine Power Plants, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterov St., 5, e-mail: matveevseu@mail.ru

Valery G. Sygakov, Dr. of Technical Sci., Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Facilities, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: Sugakov_vg@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2024.

Научная статья

УДК 681.535:621.791:629.5

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.065>

Автоматическое управление сложением лазерных пучков для реализации лучевых технологий высокой мощности в судостроительном производстве

Бурмистров Е.Г.¹ burmistrov_e_g@mail.ru, Кузнецов И.И.² kuznetsov@ipfran.ru,

Смолин П.А.¹ smolin-nn@yandex.ru, Федосенко Ю.С.¹ fds1707@mail.ru,

¹Волжский государственный университет водного транспорта, ²Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН»

Аннотация. В целях внедрения передовых производственных процессов в судостроении, в частности, высокоточной резки, сварки (в том числе и микро-) и других видов обработки особо толстых металлических и неметаллических материалов перспективным представляется развитие лучевых технологий высокой мощности – до десятков киловатт в непрерывном режиме. Один из возможных подходов к генерации излучения такой мощности основан на пространственном совмещении с высокой степенью когерентности нескольких поступающих по разным каналам лазерных пучков. Соответственно, такой подход предполагает необходимость обеспечения в реальном времени равенства фаз лазерных пучков с технически минимально возможной погрешностью. Развиваемый в данной статье способ автоматического управления когерентным сложением основан на определении и поочередной взаимной компенсации относительной разности фаз лазерных пучков. В контексте предлагаемого способа управления когерентным сложением лазерных пучков в статье обсуждаются результаты его теоретического исследования, программного моделирования и экспериментальной апробации.

Ключевые слова: автоматическое управление, лазерные технологии, лучевые технологии высокой мощности, судостроение

Для цитирования: Бурмистров Е.Г., Кузнецов И.И., Смолин П.А., Федосенко Ю.С. Автоматическое управление сложением лазерных пучков для реализации лучевых технологий высокой мощности в судостроительном производстве. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.065

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.065>

Automatic control of the addition of laser beams for the implementation of high-power beam technologies in shipbuilding

Evgeniy G. Burmistrov¹ burmistrov_e_g@mail.ru, Ivan I. Kuznetsov² kuznetsov@ipfran.ru,

Pavel A. Smolin¹ smolin-nn@yandex.ru, Yuri S. Fedosenko¹ fds1707@mail.ru

¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation, ²Federal Research Center «A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. In order to introduce advanced production processes in shipbuilding, in particular, high-precision cutting, welding (including micro) and other types of processing of especially thick metal and non-metallic materials, the development of high-power beam technologies - up to tens of kilowatts in continuous seems promising. One of the possible approaches to generating radiation of such power is based on the spatial combination with a high degree of coherence of several laser beams coming through different channels. Accordingly, this approach assumes the need to ensure real-time equality of the phases of laser beams with the technically minimum possible error. The method of automatic control of coherent addition developed in this article is based on the determination and alternate mutual compensation of the relative phase difference of laser beams. In the context of the proposed method for controlling coherent addition of laser beams, the article discusses the results of its theoretical study, software modeling and experimental testing.

Keywords: Automatic control, laser technologies, high power laser beam technology, shipbuilding

For citation: Evgeniy G. Burmistrov, Ivan I. Kuznetsov, Pavel A. Smolin, Yuri S. Fedosenko, Automatic control of the addition of laser beams for the implementation of high-power beam technologies in shipbuilding. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 107—113. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.065

Введение

Реализация ряда перспективных технологических процессов, в частности, в атомном судостроении для высокоточной резки, сварки (в том числе и микро-), других видов обработки особо толстых металлических и неметаллических материалов перспективным представляется развитие лучевых

технологий высокой мощности [1] – до десятков киловатт в непрерывном режиме.

Промышленное внедрение таких технологий позволит отрабатывать принципиально новые конструкторские решения [2].

Один из подходов к генерации лазерного излучения такой мощности, активно развиваемый в последние годы [3], основан на пространственном

совмещении с высокой степенью когерентности нескольких поступающих по разным каналам лазерных пучков [4–8]. Соответственно такой подход предполагает необходимость обеспечения в реальном времени равенства их фаз с технически минимальной возможной погрешностью. Если фазы лазерных пучков недостаточно когерентны, то при их сложении, суммарный эффект может оказаться недостаточным для генерации требуемой мощности. Причиной расстройки фаз являются шумы, обусловленные, в основном, с тепловыми эффектами и механическими воздействиями, всегда имеющими место, как в составляющих компонентах лазерного комплекса, так и во внешней среде.

Среди наиболее известных способов когерентного сложения поступающих по разным каналам лазерных пучков отметим следующие три.

«Первый» способ [5] основан на определении отклонения фазы излучения в каждом канале от фазы опорного лазерного пучка, поступающего по выделенному дополнительному каналу. Недостаток данного способа заключается в использовании многоканального фотоприемника, что усложняет юстировку комплекса, а также в необходимости формирования опорного лазерного излучения. В известных комплексах, реализующих такого типа когерентное сложение лазерных пучков, обратная связь (ОС) конструктивно формируется средствами аналоговой схемотехники, вследствие чего существенно ограничиваются возможности реализации гибкой настройки.

«Второй» способ [7] основан на определении и поочередной компенсации относительной разности фаз лазерных пучков в каждом канале. Особенностью способа является использование двух регуляторов фазы на один канал, а также использование независимой системы управления для каждого канала, что заметно усложняет настройку лазерного комплекса в целом.

«Третий» способ [8] когерентного сложения основан на определении и поочередной компенсации

относительной разности фаз лазерных пучков в каждом канале. Однако этот способ предусматривает подмешивание в первичный лазерный пучок псевдослучайного шума со специально подобранным спектром, что не всегда технически приемлемо. Как показали эксперименты, при таком подходе возможно проявление аномалий в работе лазерного комплекса, ограничивающие сходимость фаз и вызывающие нестабильность его функционирования.

Развиваемый в данной статье способ управления когерентным сложением основан на определении и автоматической поочередной взаимной компенсации относительной разности фаз лазерных пучков. При таком подходе отсутствуют недостатки всех трех вышеотмеченных способов.

Принцип реализации предлагаемого способа управления когерентным сложением лазерных пучков для реализации лучевых технологий высокой мощности в судостроительном производстве, результаты его теоретического исследования, программного моделирования и экспериментальной апробации рассматриваются ниже в статье в рамках включающего четыре идентичных канала твердотельного лазерного комплекса на основе кристалла Yb:YAG с диодной накачкой [1].

Постановка задачи

Объектом автоматизации является работающий в непрерывном режиме лазерный комплекс, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Сигнал непрерывной задающего лазерного устройства делится на четыре реплики – K_1, K_2, K_3, K_4 , каждая из которых пропускается через свой регулятор фазы и усилитель. В качестве регуляторов фазы используются зеркала, установленные на пьезоэлементы. Подстройка фазы осуществляется за счет подачи напряжения на пьезоэлемент. Затем все четыре реплики фокусируются на датчик через маску (диафрагма с малым диаметром отверстия).

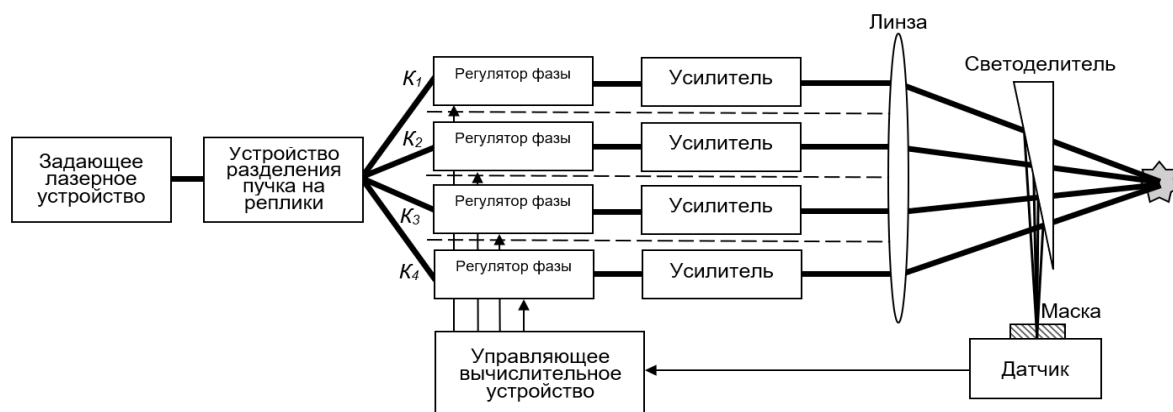


Рис. 1. Функциональная схема лазерного комплекса.

Тепловые эффекты в материале усилителей и в среде распространения, а также механические смещения рассогласовывают длину пути лазерных реплики, снижая таким образом суммарную эффективную мощность пучков в точке фокусировки. Если все реплики имеют одинаковую фазу, они интерферируют, обеспечивая прохождение через маску излучения наибольшей мощности и, соответственно, максимальный сигнал датчика. Для

стабилизации фазы достаточно контролировать изменение фазы – длину пути в диапазоне ± 0.5 мкм.

Суммарная энергия $E(t)$ интерферирующих лазерных пучков [9] определяется по формуле

$$E(t) = \sum_{n=1}^4 E_{n0}(t) \cos(\omega_n t - \varphi_{n0}), \quad (1)$$

где: $E_{n0}(t)$ – амплитуда энергии лазерного пучка в канале с номером n ; ω_n – угловая частота; φ_{n0} – изменяемый во времени сдвиг фазы, который для

поддержания когерентности лазерных пучков необходимо компенсировать в реальном времени.

Описываемая ниже схема решения задачи автоматического управления в реальном времени процессом выравнивания фаз основана на идее непрерывной оптимизации [11] унимодальной функции, соответствующей энергии $E(t)$ суммарного пучка.

Для реализации такого подхода выбран метод последовательного градиентного спуска [12], алгоритм которого представлен на рис. 2.

На первом по времени шаге выполнения алгоритма вычисляется энергия интерференции сигналов. На втором шаге вычисляются фазы каждого канала с учетом шума, и для одного канала фаза сдвигается на $\Delta\varphi'_n(t)$; вновь вычисляется интенсивность интерференции сигналов и сравнивается с предыдущим значением: если произошло уменьшение интенсивности интерференции сигналов, то осуществляется сдвиг фазы канала на величину $-2\Delta\varphi'_n(t)$, иначе осуществляется переход к выполнению третьего шага. На третьем шаге операции повторяются для следующего канала и т.д. Подстройка осуществляется в каналах поочередно.

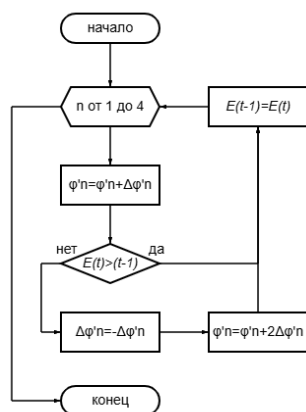


Рис. Блок-схема алгоритма реализации последовательного градиентного спуска.

Программное моделирование

В целях апробации выдвинутой идеи автоматического управления выравниванием фаз лазерных пучков в среде пакета MATLAB построена программная модель, имитирующая работу четырехканального лазерного комплекса.

Для случая идентичных каналов и неавтономности сдвига фаз, формула для подсчета суммарной энергии интерферирующих лазерных пучков в модели, согласно (1) имеет следующий вид

$$\begin{aligned}
 E(t) &= E_0(c + \sigma_1(t) + \sigma_2(t) + \sigma_3(t)), \\
 \sigma_1(t) &= \cos(\varphi_1(t) - \varphi_2(t)) \\
 &\quad + \cos(\varphi_1(t) - \varphi_3(t)), \\
 \sigma_2(t) &= \cos(\varphi_1(t) - \varphi_4(t)) \\
 &\quad + \cos(\varphi_2(t) - \varphi_3(t)), \\
 \sigma_3(t) &= \cos(\varphi_2(t) - \varphi_4(t)) \\
 &\quad + \cos(\varphi_3(t) - \varphi_4(t)), \\
 \varphi_n(t) &= (\omega_n t - \varphi_n(t)) + \varphi'_n(t),
 \end{aligned} \quad (2)$$

где: t – время; E_0 – амплитуда энергии суммарного лазерного пучка; c – параметр смещения; $\varphi_n(t)$ – фаза лазерного пучка в канале; $\varphi'_n(t)$ – параметр, характеризующий величину неавтономности фазы лазерного пучка; $\varphi'_n(t)$ – величина компенсации неавтономности фазы лазерного пучка ω_n – угловая частота лазерного пучка в канале [10].

Шум фазы лазерного пучка в программной модели задается дискретной во времени последовательностью значений сигнала для каждого канала с граничной частотой f и функцией спектральной плотности мощности вида $\varphi'_n(f) = 1/f$. При этом количество временных отсчетов по сравнению с исходной последовательностью значений увеличено в 10^2 раз интерполяцией функции шума сплайнами.

Алгоритм непрерывной оптимизации реализуется в программной модели согласно блок-схеме на рис. 2.

Интенсивность интерференции сигналов вычисляется в случае без обратной связи, а также в режиме с обратной связью с различными значениями шага подстройки фазы при частоте повторения цикла выполнения алгоритма в 1 кГц.

На рис. 3 в логарифмической шкале приведены графики спектральной плотности мощности лазерного излучения при отсутствии обратной связи («Без ОС») и при наличии обратной связи («С ОС») для следующих значений шага подстройки фазы: 1,5 рад, 0,25 рад, 0,075 рад.

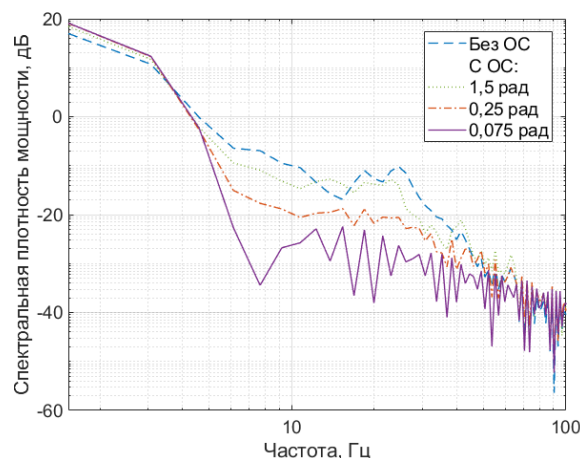


Рис. 3. Диаграмма распределения спектральной плотности мощности при различных режимах.

Выполненное программное моделирование продемонстрировало сходимость алгоритма непрерывной оптимизации с погрешностью 1% при шаге подстройки фазы 0.075 радиан.

Как видно из приведенной диаграммы на рис. 3, в режиме «С ОС – 0,075 рад» эффективность подавления шумов в полосе до 50 Гц оценивается величиной среднеквадратичного отклонения порядка 1,5% относительно собственной спектральной плотности мощности суммарного лазерного излучения.

Подавление гармонических составляющих в диапазоне частот до 50 Гц составляет 20 дБ.

Физический эксперимент

Помимо схем питания, усиления, согласования уровней напряжения и связи с ЭВМ система автоматического управления процессом выравнивания фаз лазерных пучков включает в себя микроконтроллер с ядром Cortex-M4F, реализующий следующие процедуры:

- хранит программу непрерывной оптимизации и её параметры,
- преобразует встроенным аналого-цифровым преобразователем аналоговый сигнал в дискретный код,
- исполняет основной алгоритм системы,
- выполняет цифро-аналоговые преобразования сигналов,
- передает по цифровому интерфейсу рассчитанные значения цифро-аналоговым преобразователям,

Вычислительная часть системы управления выравниванием фаз включает в себя также два независимых микроконтроллера – основного и вспомогательного. Основной микроконтроллер обрабатывает аналоговый сигнал с датчика, циклически выполняет алгоритм решения задачи непрерывной оптимизации и формирует выходные напряжения для регуляторов фаз. Также этот микроконтроллер формирует поток диагностических сигналов от датчиков лазерного комплекса и обрабатывает управляющие данные от

вспомогательного микроконтроллера, реализующего пользовательский и MODBUS-TCP интерфейсы для внешнего управления параметрами работы системы автоматического управления процессом выравнивания фаз.

В целях контроля функционирования основного микроконтроллера процессорное время выделяется только для алгоритма оптимизации.

Функциональная схема системы управления выравниванием фаз представлена на рис. 4.

На рис. 5 представлена временная диаграмма сигнала (напряжения) с датчика при различных режимах работы системы автоматического управления процессом выравнивания фаз лазерных пучков.

Амплитуда пульсаций в режиме «Без ОС» оценивается величиной среднеквадратичного отклонения порядка 60%. Зафиксированная при этом минимальная выходная мощность суммарного пучка составила 20%. Амплитуда пульсаций в режиме «С ОС», т.е. при активации системы автоматического выравнивания фаз, оценивается величиной среднеквадратичного отклонения порядка 3%. Зафиксированная при этом минимальная выходная мощность суммарного пучка составила 95 %.

В процессе тестовых испытаний автоматической системы выравнивания фаз продемонстрирована длительная стабильная работа комплекса.

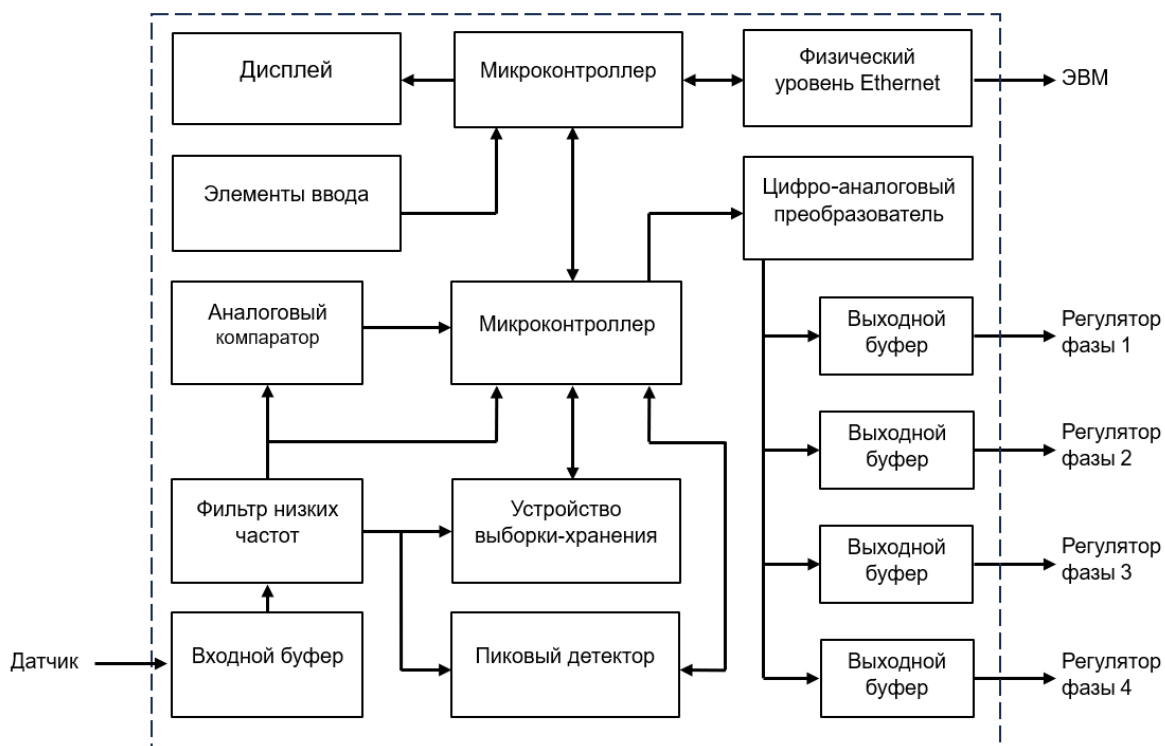


Рис. 4. Функциональная схема системы управления выравниванием фаз.

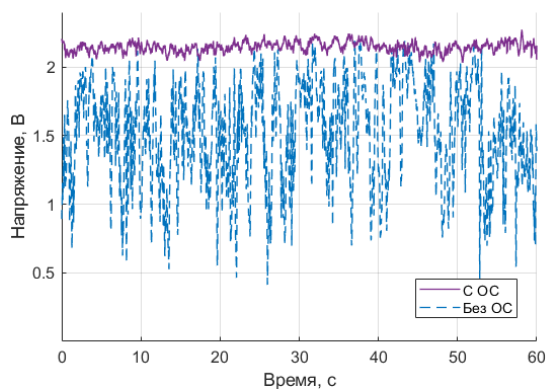


Рис. 5. Временная диаграмма значений напряжения датчика при различных режимах работы.

На рис. 6 совместно представлены графики распределения спектральной плотности мощности

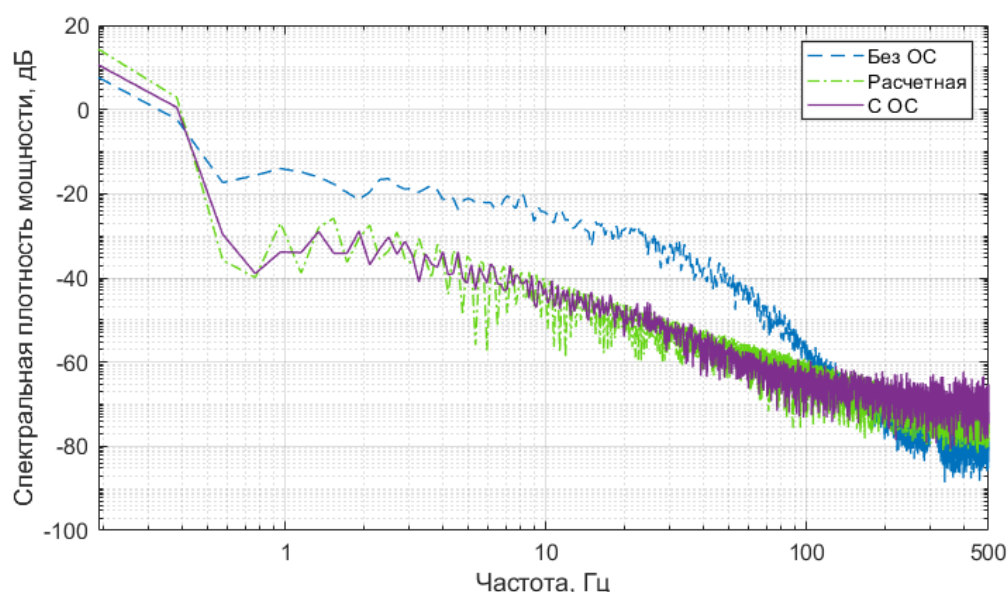


Рис. 6. Диаграмма распределения спектральной плотности мощности при различных режимах работы системы автоматического управления выравниванием фаз.

Выводы

Выполненные в работе исследования, программное моделирование и физические эксперименты подтвердили корректность постановки задачи и идеи автоматического управления выравниванием фаз лазерных пучков путем реализации алгоритма непрерывной оптимизации в реальном времени.

Результаты физических экспериментов также продемонстрировали стабильную работу разработанной системы автоматического управления процессом когерентного сложения лазерных пучков в условиях теплового и механического воздействий.

суммарного лазерного излучения при работе в режимах «Без ОС» и с «С ОС», а также приведена расчетная спектральная плотность мощности при работе системы автоматического управления процессом выравнивания фаз.

Эффективность подавления шумов в полосе до 100 Гц за промежуток времени длительностью 1 час оценивается величиной среднеквадратичного отклонения порядка 1,5% относительно собственной спектральной плотности мощности суммарного лазерного излучения в режиме «Без ОС».

Подавление гармоник в диапазоне частот до 50 Гц при этом составляет 20 дБ.

График распределения спектральной плотности мощности в режиме «С ОС» практически соответствует расчетным значениям; отличия проявляются лишь на частоте 100 Гц и выше. Однако мощность суммарного пучка в этом диапазоне крайне мала и не имеет практического значения.

Предложенный способ выравнивания фаз без корректировки может быть реализован в твердотельном лазерном комплексе с большим числом каналов. Стабильность мощности и энергетическая эффективность лучевых технологий, достигаемые с использованием предложенного способа открывают возможность промышленного внедрения принципиально новых конструкторских и технологических решений в судостроительном производстве. Перспективной также представляется разработка систем автоматического управления когерентным сложением лазерных пучков для реализации импульсных технологических режимов высокой мощности.

Литература

1. Алексушин, Г.В. Развитие атомного ледокольного флота и его роли в экономическом освоении Северного морского пути // Арктика и Север. 2023. № 53. С. 28–35. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.53.28
2. Сухов, А.Г. О промышленном применении лазерных технологий / А.Г. Сухов, С.М. Шанчуров // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 25-27 ноября 2014 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 163-168.

3. Кузнецов, И.И. Активные элементы в виде тонких стержней квадратного сечения для многоканальных лазерных усилителей // Квантовая электроника, 2021. 51, № 8 С. 708-711.
4. Leshchenko, V.E. Coherent combining efficiency in tiled and filled aperture approaches / Optics Express 23 (12), 2015. – 16 с.
5. Пырков, Ю.Н. Способ когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием и устройство для когерентного сложения лазерных пучков с синхронным детектированием / Пырков Ю.Н., А.С. Курков, А.И. Трикшев, В.Б. Цветков / Патент РФ № RU2 488 862 С1. Опубликовано: 27.07.2013. Бюл. № 21.
6. Bagayev, S.N. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals / S.N. Bagayev, V.E. Leshchenko, V.I. Trunov, E.V. Pestryakov and S.A. Frolov // OPTICS LETTERS. 2014. – № 39 – 4 с.
7. Hongxiang Chang. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 fiber lasers / Hongxiang Chang, Qi Chang, Jiachao Xi // Photonics Research. 2020. – № 8.
8. Yanxing, Ma. Coherent beam combination with single frequency dithering technique / Ma Yanxing, Zhou Pu Wang Xiaolin et al. // Optics letters 35, 9 (2010), 1308-1310.
9. Калитеевский, Н.И. Волновая оптика. СПб.: Лань. 2008. – 480 с.
10. Fan, T.Y. Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2005. №11. – 4 с.
11. Певнева, А.Г. Методы оптимизации / А.Г. Певнева, М.Е. Калинкина. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. 2020. – 64 с.
12. Гончаров, В.А. Методы оптимизации. / М.: Юрайт. 2024. – 191 с.
13. Charles, Palmer, Sujeet Shenoï/ Critical Infrastructure Protection III: Third IFIP WG 11. 10 International Conference, Hanover, New Hampshire, USA, March 23-25, 2009. Revised Selected Papers Springer.
14. Pulford, Benjamin LOCSET phase locking: operation, diagnostics, and applications / Benjamin Pulford //dis. 2012 – 214 p.

References

1. Aleksushin, G.V. The Nuclear Icebreaker Fleet and Its Role in the Economic Development of the Northern Sea Route. Arktika i Sever [Arctic and North], 2023, no. 53, pp. 28–35. DOI: 0.37482/issn2221-2698.2023.53.28.
2. Suhov, A.G. O promyshlennom primenenii lazernykh tekhnologij / A.G. Suhov, S.M. Shanchurov // Svarka i diagnostika: collection of reports of the international forum – Ekaterinburg: Ural Federal University, 2015. – P. 163-168.
3. Kuznecov, I.I. Aktivnye elementy v vide tonkih sterzhnej kvadratnogo secheniya dlya mnogokanal'nykh lazernykh usilitelej / I.I. Kuznecov// Kvantovaya elektronika. 2021. 51, № 8 P. 708-711.
4. Leshchenko, V.E. Coherent combining efficiency in tiled and filled aperture approaches / Optics Express 23 (12), 2015. – 16 p.
5. Pyrkov, YU.N. Sposob kogerentnogo slozheniya lazernykh puchkov s sinhronnym detektirovaniem i ustrojstvo dlya kogerentnogo slozheniya lazernykh puchkov s sinhronnym detektirovaniem. YU.N. Pyrkov, A.S. Kurkov, A.I. Trikshev, V.B. Cvetkov. Patent of the Russian Federation № RU2 488 862 C1 Published: 27.07.2013 № 21.
6. Bagayev, S.N. Coherent combining of femtosecond pulses parametrically amplified in BBO crystals / S.N. Bagayev, V.E. Leshchenko, V.I. Trunov, E.V. Pestryakov and S.A. Frolov // OPTICS LETTERS. 2014. – № 39 – 4 p.
7. Hongxiang Chang. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 fiber lasers / Hongxiang Chang, Qi Chang, Jiachao Xi // Photonics Research. 2020. – № 8.
8. Yanxing Ma. Coherent beam combination with single frequency dithering technique / Ma Yanxing, Zhou Pu Wang Xiaolin et al // Optics letters 35, 9 (2010), 1308-1310.
9. Kaliteevskij, N.I. Volnovaya optika. Saint Petersburg: Lan'. 2008. – 480 p.
10. Fan, T.Y. Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2005. № 11 – 4 p.
11. Pevneva, A.G. Metody optimizacii / A.G. Pevneva, M.E. Kalinkina. Saint Petersburg: Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. – 64 p.
12. Goncharov, V.A. Metody optimizacii : uchebnoe posobie dlya vuzov / – Moscow: Izdatel'stvo YUrajt. 2024. – 191 p.
13. Charles Palmer, Sujeet Shenoï. Critical Infrastructure Protection III: Third IFIP WG 11. 10 International Conference, Hanover, New Hampshire, USA, March 23-25, 2009. Revised Selected Papers Springer. 2009.
14. Pulford Benjamin LOCSET phase locking: operation, diagnostics, and applications // thesis 2012 – 214 p.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензенты или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурмистров Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, ул. Нестерова, 5а, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Кузнецов Иван Игоревич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории диагностики оптических материалов для перспективных лазеров, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» e-mail: kuznetsov@ipfran.ru

Павел Андреевич Смолин, аспирант кафедры Систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, ул. Нестерова, 5а, e-mail: smolin-nn@yandex.ru

Юрий Семенович Федосенко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603950, ул. Нестерова, 5а, e-mail: fds1707@mail.ru

Evgeniy G. Burmistrov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Volga State University of Water Transport, Nesterova St., 5a, Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Ivan I. Kuznetsov, Ph.D. (Phys & Math), senior researcher of Diagnostics of Optical Materials for Advanced Lasers lab., Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kuznetsov@ipfran.ru

Pavel A. Smolin, graduate student of the Department Systems of Information Security Systems, Control and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, Nesterova St., 5a, Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: smolin-nn@yandex.ru

Yuri S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department Systems of Information Security Systems, Control and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, Nesterova St., 5a, Nizhniy Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 02.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 09.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2024.

Научная статья

УДК 001.891.573

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.066>

Управление автономным подруливающим устройством

Бурылин Я.В.¹ y.burylin@gmail.com, Попов А.Н.¹ an.popov.mga@gmail.com,
Кондратьев С.И.¹ sikondr@gamil.com, Боран-Кешишьян А.Л.¹ bk.anastas@gmail.com,
Соловьёв А.В.² avsolovev@rfclass.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, ²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье предлагаются алгоритмы автоматического управления автономным подруливающим устройством в различных режимах его эксплуатации. Устройство предназначено для кантования судна в стесненных условиях порта с целью безопасной постановки к причалу на смену обычным буксирам-кантовщикам. В режиме свободного хода по заданной траектории авторулевой устройства имеет вид расширенного ПИД регулятора по курсу с учетом поправки за отклонение от траектории. Для обеспечения режима динамического позиционирования используются оба азипода и работают синхронно в направлении, обратном отклонению от заданной точки. В режимах эскортирования и сближения с судном учитываются скорости и курсы судна и устройства для решения задачи стабилизации устройства по ориентации и направлению движения. Для режима подруливания производится декомпозиция управления по каналам средств управления, когда азиподы, работая совместно, обеспечивают управление по поперечному и вращательному движениям, главный двигатель судна - по продольному движению. В режиме швартовки характер управления носит черты как алгоритма управления по траектории, так и режима динамического позиционирования.

Ключевые слова: безэкипажное судно, е-навигация, автоматическое управление, подруливающее устройство, буксир.

Для цитирования: Бурылин Я.В., Попов А.Н., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Соловьёв А.В. Управление автономным подруливающим устройством. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 114—120. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.066

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.066>

Autonomous thruster control

Yaroslav V. Burylin¹ y.burylin@gmail.com, Anatoly N. Popov¹ an.popov.mga@gmail.com,
Sergey I. Kondratiev¹ sikondr@gamil.com, Anastas L. Boran-Keshishyan¹ bk.anastas@gmail.com,
Alexey V. Soloviev² avsolovev@rfclass.ru

¹Admiral Ushakov maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation, ²Volga State University of Water Transport

Abstract. The article proposes algorithms for automatic control of an autonomous thruster in various modes of its operation. The device is intended for tilting a vessel in cramped port conditions for the purpose of safe docking at the berth to replace conventional tugboats. In the free-wheeling mode along a given trajectory, the autopilot has the form of an extended PID heading controller, taking into account corrections for deviation from the trajectory. To ensure dynamic positioning mode, both azipods are used and operate synchronously in the direction opposite to the deviation from a given point. In the modes of escorting and approaching a vessel, the speeds and courses of the vessel and the device are taken into account to solve the problem of stabilizing the device in orientation and direction of movement. For the steering mode, control is decomposed into control channels, when the azipods, working together, provide control for transverse and rotational movements, and the main engine of the vessel - for longitudinal movement. In the mooring mode, the nature of the control has the features of both the trajectory control algorithm and the dynamic positioning mode.

Key words: unmanned vessel, e-navigation, automatic control, thruster, tug

For citation: Yaroslav V. Burylin, Anatoly N. Popov, Sergey I. Kondratiev, Anastas L. Boran-Keshishyan, Alexey V. Soloviev Autonomous thruster control. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 114—120. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.066

Введение

Современные тенденции развития мировой отрасли морских грузоперевозок направлены на автоматизацию всех ее аспектов включая как морской, так и береговой сегменты, как судовую, так и портовую инфраструктуры [1,2]. Современные суда оснащены средствами автоматической проводки, как

правило интегрированные с судовыми электронными информационными системами, которые способны управлять судно по заданной траектории, без учета расхождения с навигационными опасностями. Для решения задачи автоматического расхождения судов в море необходимо проработать аспекты распознавания опасностей и применения правил МППСС для автономных судов.

Навигационный сегмент портовой инфраструктуры, а именно лоцманская проводка, эскортирование, кантование и швартовка крупнотоннажного судна в автоматическом режиме проработан в меньшей степени [3-7]. Оборудование судов мирового флота средствами управления, способными автономно осуществлять маневрирование в стесненных условиях порта экономически не обосновано, поскольку дорогостоящее оборудование будет задействовано менее 0.1% времени эксплуатации судна. Естественным выходом из ситуации является автоматизация буксирного портового флота [7-17]. Автоматические буксиры-автоматы будут использоваться в качестве автономных подруливающих устройств (АПУ) для любых судов, обрабатывающихся в порту. Создавая задел на

автоматизацию буксирного флота, можно экстраполировать этот опыт на другие ниши портовых операций: бункеровка, поиск и спасание, устранение разливов нефтепродуктов, сборка мусора, техническое обслуживание портовых сооружений, перевозка пассажиров и грузов внутри порта.

1. Средства управления АПУ

Расположение азиподов в ДП на баке и корме буксира обеспечивает его абсолютную маневренность на морской поверхности. Буксир может двигаться с любым ПУ и углом дрейфа. Само понятие курса для такого судна теряет свою фундаментальность, поскольку судно симметрично относительно как ДП так и МШ.

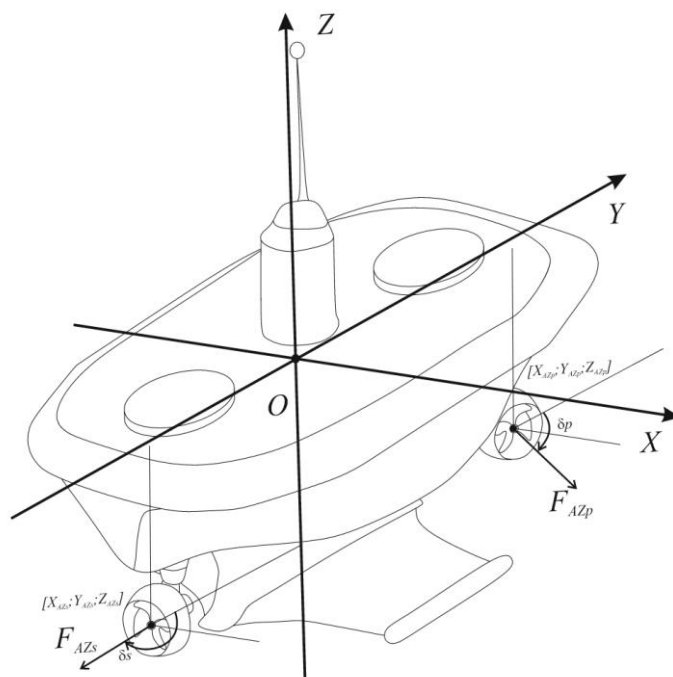


Рисунок 1. АПУ в подвижной системе координат

Составляются уравнения сил и моментов, развиваемых средствами управления судном в соответствии с их расположением и тактико-техническими свойствами. Судно рассматривается в связанной с ним подвижной системе отсчета $OXYZ$ (рис. 1), начало которой расположено в центре тяжести судна, ось Ox является продольной осью судна и направлена от кормы в нос, ось Oy является поперечной осью судна и направлена от левого к правому борту, ось Oz перпендикулярна плоскости палубы и направлена от днища к палубе. Тогда центр винта левого азипода будет иметь координаты $[X_{AZp}, Y_{AZp}, Z_{AZp}]$, центр винта правого азипода будет иметь координаты $[X_{AZs}, Y_{AZs}, Z_{AZs}]$.

Теперь можно записать уравнения сил и моментов от винтов средств управления относительно центра масс (ЦМ) судна.

$$\begin{aligned} N_x &= F_{AZp} \cos \delta_p + F_{AZs} \cos \delta_s; \\ N_y &= F_{AZp} \sin \delta_p + F_{AZs} \sin \delta_s; \\ N_z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где F_{AZp} , F_{AZs} , F_{BTA} , F_{BTI} – силы упора винтов левого азипода, правого азипода, переднего НПУ, заднего НПУ соответственно;

δ_s , δ_p – углы поворота азиподов, причем нулевым является положение, при котором упор азипода сонаправлен с отрицательным направлением оси Ox , поворот по часовой стрелке является отрицательным;

N_x , N_y , N_z – ортогональные силы, действующие на ЦМ судна.

$$\begin{aligned}
 M_x &= F_{Azp} \sin \delta_p \sqrt{Z_{Azp}^2 + Y_{Azp}^2} + F_{Azs} \sin \delta_s \sqrt{Z_{Azs}^2 + Y_{Azs}^2}; \\
 M_y &= F_{Azp} \cos \delta_p \sqrt{Z_{Azp}^2 + X_{Azp}^2} + F_{Azs} \cos \delta_s \sqrt{Z_{Azs}^2 + X_{Azs}^2}; \\
 M_z &= F_{Azp} \sin(\delta_p + \operatorname{atg}(X_{Azp}/Y_{Azp})) \sqrt{X_{Azp}^2 + Y_{Azp}^2} + \\
 &+ F_{Azs} \sin(\delta_s + \operatorname{atg}(X_{Azs}/Y_{Azs})) \sqrt{X_{Azs}^2 + Y_{Azs}^2}, \\
 \begin{cases} \dot{v}_x = \frac{(m + \lambda_{22}) v_y \omega_z + \lambda_{26} \omega_z^2 + N_x}{m + \lambda_{11}}; \\ \dot{v}_y = -\frac{(\lambda_{11} - \lambda_{22}) \lambda_{26} v_x v_y - ((J_z + \lambda_{66})(m + \lambda_{11}) - \lambda_{26}^2) v_x \omega_z + (J_z + \lambda_{66}) N_y - \lambda_{26} M_z}{(J_z + \lambda_{66})(m + \lambda_{22}) - \lambda_{26}^2}; \\ \dot{\omega}_z = \frac{(m + \lambda_{22})(\lambda_{11} - \lambda_{22}) v_x v_y + (\lambda_{11} - \lambda_{22}) \lambda_{26} v_x \omega_z - \lambda_{26} N_y + (m + \lambda_{22}) M_z}{(J_z + \lambda_{66})(m + \lambda_{22}) - \lambda_{26}^2}; \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

где M_x, M_y, M_z – моменты, действующие относительно ЦМ судна.

Если рассматривать движение судна только в горизонтальной плоскости, то система уравнений (4) вырождается в следующую систему трех уравнений

Предполагается пять режимов работы АПУ: движение по заданной траектории, динамическое позиционирование, эскортирование судна, стыковка, подруливание. Каждый из этих режимов подразумевает свой способ автоматического управления.

2. Режим свободного хода

Движение по траектории, заданной географическими координатами до точки эскортирования судна. Традиционно, буксиры заблаговременно подходят к точке рандеву (ТР) с судном и ожидают его для дальнейшего эскортирования. Предполагается, что АПУ движется до ТР по координатам, заданным оператором, из места своего базирования или текущего местонахождения. Возможен вариант, когда АПУ самостоятельно строит маршрут на переход до ТР, но запрашивает разрешения на его выполнение у

оператора, либо СУДС. Самостоятельно строить и выполнять маршрут для АПУ недопустимо ввиду того, что оно не сможет принять в расчет всю полноту информации о текущих навигационных процессах в порту.

Предполагается, что в этом режиме движение осуществляется задействованием одного из азиподов в качестве заднего толкающего. Способ движения, когда задействуется оба азипода не эффективен, поскольку набегающая струя от переднего азипода на задний, будет ухудшать его упор, а следовательно, и устойчивость судна на курсе и управляемость. Использование одного азипода в качестве переднего тянущего будет иметь те же, но более выраженные, следствия.

В качестве алгоритма автоматического управления может быть использован ПИД-регулятор следующего вида:

$$\begin{cases} \delta_p = a_{pr} (K_p + \Delta K_\chi - K) + a_{in} \int (K_p + \Delta K_\chi - K) dt + a_d \omega; \\ \Delta K_\chi = b_{pr} \chi + b_{in} \int \chi dt, \end{cases} \quad (4)$$

где K, K_p – курсы исполняемый и заданный;
 ΔK_χ – поправка к заданному курсу за отклонение от траектории;
 $a_{pr}, a_{in}, a_d, b_{pr}, b_{in}$ – коэффициенты;
 ω, χ – угловая скорость и отклонение от траектории;
 δ_p – заданный угол перекадки азипода.

Ввиду относительно небольшого водоизмещения АПУ, маневрирование линейной скоростью не требует особого алгоритма. За несколько десятков метров до достижения конечной точки траектории производится гашение скорости и АПУ переходит в режим динамического позиционирования, ожидая судно или дальнейшие команды, либо швартуется в месте базирования.

3. Режим динамического позиционирования

В режиме ожидания судна в ТР или удержания текущей позиции, заданной географическими координатами АПУ корректирует свое местоположение при помощи обоих азиподов. В

каждый момент времени система автоматического управления рассчитывает дистанцию и направление из текущей позиции в заданную. При отклонении от заданного местоположения сверх допустимого значения АПУ поворачивает оба азипода по направлению, противоположному направлению в заданную точку и включает малый ход на несколько секунд. Поскольку нет практической необходимости в более точном удержании судна в заданных координатах, можно подобрать значения допустимого отклонения, времени отработки азиподами малого хода для текущей скорости дрейфа.

Для задач более точного удержания судна в позиции, например при динамическом

позиционировании, необходимо применять ПИД-регуляторы по скорости и направлению движения АПУ.

$$\begin{cases} D > D_{зад}; \\ \delta_p = Az - K; \\ \eta = c_{pr} D + c_{in} \int D dt + c_d \dot{D}, \end{cases} \quad (5)$$

где η , δ – частота вращения и угол перекладки азиподов;
 K , $D_{зад}$ – курс АПУ, максимальное отклонение от заданной точки;

D , Az – дистанция и направление до заданной точки.

4. Режим эскортирования

При эскортировании судна происходит управление АПУ по заданным курсу и скорости, которые соответствуют кинематическим параметрам эскортируемого судна. В качестве средства управления АПУ в этом режиме может выступать один задний толкающий азипод. В качестве алгоритма управления по курсу можно использовать алгоритм (4), где заданным будет курс судна, а отклонением – отклонение от заданной дистанции сопровождения судна. В качестве регулятора по скорости выступит обычный ПИД-регулятор, где заданной скоростью будет скорость эскортируемого судна:

$$\begin{cases} \delta_p = a_{pr} (K_p + \Delta K_\chi - K) + a_{in} \int (K_p + \Delta K_\chi - K) dt + a_d \omega; \\ \Delta K_\chi = b_{pr} \chi + b_{in} \int \chi dt; \\ \begin{cases} V_p = c_{pr} \Delta V + c_{in} \int \Delta V dt + c_d \dot{\Delta V}; \\ \Delta V = V_c - V, \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

где K , K_p – исполняемый курс АПУ, курс эскортируемого судна;
 ω – угловая скорость АПУ;
 χ – и отклонение от заданной дистанции до судна;
 V_p , V_c , V – скорости: заданная, судна, исполняемая;
 a , b , c – коэффициенты;
 δ_p – заданный угол перекладки азипода.

Команда на начало сопровождения судна поступает либо от оператора, либо автоматически, когда номинированная для этого АПУ область корпуса судна входит в заданный диапазон координат. Подразумевается, что для швартовки одного судна необходимо использовать от двух до четырех АПУ, поэтому происходит централизованное распределение каждого АПУ по областям корпуса судна, предназначенным для стыковки. Как правило это скулы и срезы надстройки правого и левого бортов.

5. Режим сближения и примыкания

Процессы режима стыковки можно условно разбить на три этапа: ориентация параллельно зоне корпуса, к которой предстоит стыковка, сближение вплотную с корпусом судна с сохранением ориентации, контакт и электромагнитное примыкание к судну. В качестве алгоритмов управления АПУ в процессе подхода к судну от точки эскортирования до точки примыкания можно выбрать следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \eta_p &= p_{Dp} \left(D + d_D \frac{dD}{dt} + i_D \int D dt \right) + p_{Kp} \left(\Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right); \\ \eta_s &= p_{Ds} \left(D + d_D \frac{dD}{dt} + i_D \int D dt \right) - p_{Ks} \left(\Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right); \\ \Delta K &= K_c - K_{АПВ}; \delta_p = Az - K_{АПВ}; \delta_s = Az - K_{АПВ}; \\ D &= \sqrt{(\varphi_c - \varphi_{АПВ})^2 + \left((\lambda_c - \lambda_{АПВ}) \cos \frac{\varphi_c + \varphi_{АПВ}}{2} \right)^2}; \\ Az &= \arcsin \left(\frac{V_c \sin(Az_c - K_c)}{V_{АПВ}} \right) + Az_c - 180^\circ; \\ V_{АПВ} &= V_c \sqrt{D}, \end{aligned} \quad (6)$$

где η_s, η_p – управляющие воздействия на азиподы по частоте оборотов винтов,
 p, d, i – коэффициенты регулятора,
 D, Az – дистанция и направление до от судна до АПУ;
 Az – направление в точку касания с учетом скоростей судна и АПУ;
 $V_{АПУ}, \omega, K_{АПУ}$ – линейная и угловая скорости АПУ, курс АПУ;
 V_c, K_c – скорость и курс судна;
 δ – заданный угол перекадки азипода;
 φ, λ – широта и долгота.

Команда включения режима поступает от оператора либо по запросу от лоцмана, либо от систем управления судном, если судно автономное.

6. Режим подруливания

Работа в режиме подруливающего устройства. АПУ выполняют команды лоцмана через оператора, либо команды от автоматической системы

управления судном, если оно автономное. Тогда уравнения регулирования управляющими воздействиями для проводки судна до причала при помощи буксиров-автоматов с заданной ориентацией ДП судна могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned}\eta_{AT} &= p_{ATK} \left(\Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right) + p_{ATx} \left(\Delta x + d_x \frac{dx}{dt} + i_x \int \Delta x dt \right); \\ \eta_{FT} &= p_{FTK} \left(\Delta K + d_K \omega + i_K \int \Delta K dt \right) + p_{FTx} \left(\Delta x + d_x \frac{dx}{dt} + i_x \int \Delta x dt \right); \\ \eta_c &= p_{cy} \left(\Delta y + d_y \left(\frac{dy}{dt} \cos(K - \text{ПУ}) - V_{yt} \right) + i_y \int \Delta y dt \right); \\ x &= \Delta \sigma \sin(K - \gamma); \quad y = \Delta \sigma \cos(K - \gamma); \quad \Delta K = K_o - K,\end{aligned}\tag{7}$$

где $\eta_{FT}, \eta_{AT}, \eta_c$ – управляющие воздействия на передние, задние буксиры и главный двигатель судна по частоте оборотов винтов,
 $p_{ATK}, d_K, i_K, p_{ATx}, d_x, i_x, p_{FTK}, p_{FTx}, d_x, i_x$ – коэффициенты регулятора,
 ω – угловая скорость судна,
 $\Delta x, \Delta y$ – продольное и поперечное отклонения текущих координат судна от заданных в системе координат, связанной с главными осями судна,
 γ – путевой угол из текущей позиции в заданную,
 $\Delta \sigma$ – расстояние между текущей и заданной позициями по дуге большого круга,
 ПУ – путевой угол текущего участка заданной траектории,
 V_{yt} – заданная продольная скорость судна на текущем участке траектории.

Все предложенные регуляторы основаны на каскадном ПИД-принципе, что гарантирует достигаемость целей управления по всем управляемым параметрам при любых допустимых условиях окружающей среды.

Заключение

Предложенная система автоматического управления АПУ, оснащенным средствами управления для решения задач удержания на заданном курсе, заданной траектории, в точке, заданной координатами и примыкания к судну, обеспечивает решение устройством, поставленных перед ним спектром навигационных задач.

Используемые в качестве регуляторов каскадные ПИД алгоритмы обеспечивают надежность и устойчивость управления. Устройство может быть применяться для кантования судов, в том числе крупнотоннажных в стесненных навигационных условиях для повышения эффективности портовой инфраструктуры. Дальнейшие исследования предполагают возможность создания тренажерного центра с управляемыми моделями судов в ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова» для отработки навыков и приобретения соответствующих компетенций внешних капитанов безэкипажных морских судов.

Литература

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Пинский А.С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение. Транспорт РФ. 2016. № 4 (65). С. 50–54.
3. Carlson D. F., Fürsterling, A.L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. HardwareX, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. WMU Journal of Maritime Affairs, 2011. – P. 209–226.

5. Bayat, B. N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, 2017. № 45. - P. 76–84.
6. Matthew D., Alistair G., James U. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. *Annual of navigation*. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Патент №2021612609 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04 (2006.01), G05В 13/04 (2006.01), G08G 3/00 (2006.01). Способ автоматической проводки судна: заявл. 09.02.2021: опубл.19.02.2021/ Бuryлин Я.В., Кондратьев А.С., Попов А.Н.; заявитель ГМУ. – 4 с.
10. Гринек А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Перелыгин Д.Н., Савостеенко Н.В. Конечно-элементное моделирование судового генератора. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 4-4 (50). С. 92-97.
11. Burylin Y.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Burylin Y.V. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24.
13. Kondratyev A. I., Burylin Y. V. The method for automatic control of a ship with directional instability (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021 pp 1–7.
14. Astrein V. V., Kondratyev S.I. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021 pp 1–7.
15. V. V. Astrein, Kondratyev S.I. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021 pp 1–7.
16. Tulchinskii V. V., Tulchinskii V. I. 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021 pp 1–7.
17. Grinek A. V. Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation. *Marine intellectual technologies* Issue 4, Page 68-74, 2022 Part 1.

References

1. Allianz Global Corporate & Specialty SE «Safety and shipping review». 2018. — 48 p.
2. Pinskiy A. S. E-Navigaciya i bezekipazhnoe sudovozhdenie [E-Navigation and unmanned navigation]. *Transport RF*. 2016, №4 (65), S. 93-100.
3. Carlson D. F., Fürsterling, A.L. Vesterled, M. Skovby, S. Sejer Pedersen, C. Melvad, S. Rysgaard. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. *HardwareX*, 2019. № 6. – P. 59–78.
4. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Gluch, M., Kirchhoff, M., Klaes, S., Schroder-Hinrichs, J.U., Meibner, D., Fielitz, U., Wilske, E. e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 2011. – P. 209–226.
5. Bayat, B. N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, 2017. № 45. - P. 76–84.
6. Matthew D., Alistair G., James U. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), December 2-4, 2009, Sydney, Australia. An Autonomous Surface Vehicle for Water Quality Monitoring.
7. Narkiewicz, J. Autopilot with adaptive vessel modelling/ J.Narkiewicz, G.Świętoń. *Annual of navigation*. – 2009. – № 15. – С. 93–100.
8. L. Barbieri, F. Cucinotta, A. Gallo, F. Bruno, M. Muzzupappa, N. Penna, R. Gaudio. Design and Simulation of the Hull of a Small-Sized Autonomous Surface Vehicle for Seabed Mapping// Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 422–431.
9. Sposob avtomaticheskoy provodki sudna [Automatic pilotage method]: pat. 2021612609 Ros. Federacziya, Burylin Y.V., Kondrat'ev A.S., Popov A.N.; zayavitel' ipatentoobladatel' FGBOU VO «GMU imeni admiral F.F.Ushakova» no. 2021612609: declared. 09.02.2021: published.: 19.02.2021.
10. Grinek A.V., Fishchenko A.M., Boychuk I.P., Perelygin D.N., Savosteenko N.V. Finite element simulation of marine generators. *Marine intelligent technologies*. 2020, № 4-4 (50). S. 92–97.
11. Burylin Y.V. Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes. / International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. №2061. – P. 1–7.
12. Burylin Y.V. A method for constructing a small-sized unmanned vessel and its automatic wiring. International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021). *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. Burylin Y 2018 Identification of a non-linear ship motion model and adaptive trajectory control (dissertation abstract) (Novorossiysk: IAMU) p 24.
13. Kondratyev A. I., Burylin Y. V. The method for automatic control of a ship with directional instability (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021 pp 1–7.
14. Astrein V. V., Kondratyev S.I. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system (*Journal of Physics: Conference Series* vol 2061) 2021pp 1–7.

15. V. V. Astrein, Kondratyev S.I. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
16. Tulchinskii V. V., Tulchinskii V. I. 2021 Automatic assistance system for visual control of targets (Journal of Physics: Conference Series vol 2061) 2021 pp 1–7.
17. Grinek A. V. Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation. Marine intellectual technologies Issue 4, Page 68-74, 2022 Part 1.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бурылин Ярослав Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры судовождения, ФГБОУ ВО ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 93, проспект Ленина, Новороссийск, 353918, Российская Федерация. e-mail: y.burylin@gmail.com

Yaroslav V. Burylin, PhD (Eng), Assistant Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov maritime State University, 93, Lenin Avenue, Novorossiysk, 353918, Russian Federation. e-mail: y.burylin@gmail.com

Попов Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Россия, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: an.popov.mga@gmail.com

Anatoly N. Popov Dr. Sci. (Eng.), Professor, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, 93 Lenina Ave, e-mail: an.popov.mga@gmail.com

Кондратьев Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924 г. Новороссийск, пр.Ленина,93, e-mail: sikondr@gmail.com

Sergey I. Kondratyev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93, e-mail: sikondr@gmail.com

Боран-Кешишьян Анастас Леонидович, кандидат технических наук, доцент, проректор Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т Ленина, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D. Sci. (Eng), Assistant Professor, vice-rector of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Соловьёв Алексей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, и.о директора Верхне-Волжского филиала ФАУ «Российский Речной Регистр», 603001, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в e-mail: avsolovev@rfclass.ru

Alexey V. Soloviev, Dr. Sci. (Eng), deputy director The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office 38v Rozhdestvenskaya Str., Nizhniy Novgorod, 603001, Russian Federation e-mail: avsolovev@rfclass.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 28.10.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2024.

Научная статья

УДК 628.511.001.57:656.62.073.28

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.067>

Оценка эффективности пыле-ветрозащитных экранов в лабораторных условиях при технологии перегрузки сыпучих грузов навалом

Костюничев Д.Н.¹ kostyunichev.dn@vsuwt.ru, Отделкин Н.С.¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru,
Липатов И.В.¹ ilipatov45@gmail.com, Зименков Д.О.¹ danila_zimenkov@mail.ru, Наумов В.С.¹ nauvs@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В настоящее время грузовые районы и терминалы морских и речных портов для сыпучих грузов своей деятельностью оказывают значительное отрицательное воздействие на окружающую среду за счет пыления. В последнее время для борьбы с пылением в морских портах, где сыпучие грузы перегружаются навалом и хранятся на открытых складах, стали применяться пыле-ветрозащитные экраны, которые устанавливаются по периметру грузовых районов и терминалов. Уменьшение запыленности воздуха и пылевывоса частиц груза обусловлено снижением скорости ветрового потока при его взаимодействии с указанными экранами. Однако, процессы взаимодействия ветровых потоков с экранами изучены недостаточно. В связи с этим, целью данной работы является оценка эффективности пыле-ветрозащитных экранов в лабораторных условиях по снижению скоростей ветровых потоков. При лабораторных исследованиях использовались образцы реальных пыле-ветрозащитных экранов с различными параметрами отечественного производства. В качестве основных параметров экранов были приняты: проницаемость и жесткость экрана. Задачами исследования являлись: определение зависимости эффективности пыле-ветрозащитного экрана от скорости набегающего на него ветрового потока; влияние параметров экрана на эффективность его работы по снижению скорости ветровых потоков. Основными результатами данных исследований являются следующие выводы: жесткие пыле-ветрозащитные экраны позволяют значительно снижать скорости ветровых потоков, взаимодействующих с ними, а следовательно уменьшать запыленность и пылеунос; предложенная в статье экспериментальная методика позволяет оценить эффективность жестких пыле-ветрозащитных экранов с учетом их параметров и скоростей взаимодействующих с ними ветровых потоков; получены зависимости по оценке эффективности работы жестких пыле-ветрозащитных экранов с различными значениями проницаемости и жесткости в интервале скоростей действующих на них ветровых потоков от 2,5 м/с до 12,1 м/с.

Ключевые слова: порт, сыпучий груз, открытый склад, технология перегрузки, ветровой поток, запыленность, пылеунос, экран, защита.

Благодарности: авторы выражают глубокую благодарность компании ООО «РИД» (г. Санкт-Петербург) и лично генеральному директору Натальи Рожиной за предоставленные образцы пыле-ветрозащитных экранов.

Для цитирования: Костюничев Д.Н., Отделкин Н.С., Липатов И.В., Зименков Д.О., Наумов В.С. Оценка процессов взаимодействия ветровых потоков с жесткими экранами в условиях портовых грузовых районов для сыпучих грузов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 121—126. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.067

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.067>

Evaluation of the effectiveness of dust and wind shields in laboratory conditions with the technology of bulk cargo transshipment

Denis N. Kostyunichev¹ kostyunichev.dn@vsuwt.ru, Nikolay S. Otdelkin¹ otdelkin.ns@vsuwt.ru, Igor V. Lipatov¹ ilipatov45@gmail.com, Danila O. Zimenkov¹ danila_zimenkov@mail.ru, Victor S. Naumov¹ nauvs@mail.ru

¹Volzhsy State University of Water Transport. 5 Nesterova Str., N. Novgorod, 603950, Russian Federation

Abstract. Currently, cargo areas and terminals of sea and river ports for bulk cargoes have a significant negative impact on the environment due to dusting. Recently, dust and wind shields have been used to combat dust in seaports, where bulk cargoes are overloaded in bulk and stored in open warehouses, which are installed along the perimeter of cargo areas and terminals. The decrease in air dustiness and dust emission of cargo particles is due to a decrease in the speed of the wind flow when it interacts with these screens. However, the processes of interaction of wind flows with screens have not been studied enough. In this regard, the purpose of this work is to evaluate the effectiveness of dust and wind shields in laboratory conditions to reduce the speed of wind flows. In laboratory studies, samples of real dust and wind shields with various parameters of domestic production were used. The following were accepted as the main parameters of the screens: permeability and rigidity of the screen. The objectives of the study were: to determine the dependence of the efficiency of the dust and wind shield on the speed of the wind flow running into it; the influence of screen parameters on the effectiveness of its work to reduce the speed of wind flows. The main results of these studies are the following conclusions: rigid dust and wind shields can significantly reduce the speeds of wind flows interacting with them, and therefore reduce dust and dust loss; the experimental technique proposed in the article allows us to evaluate the effectiveness of rigid dust and wind shields, taking into account their parameters and the

speeds of wind flows interacting with them; dependences on the assessment are obtained the efficiency of operation of rigid dust and wind shields with different values of permeability and stiffness in the range of speeds of wind flows acting on them from 2.5 m/s to 12.1 m/s.

Keywords: port, bulk cargo, open warehouse, overload technology, wind flow, dustiness, dust removal, screen, protection.

Acknowledgements: the authors express their deep gratitude to the company REED LLC (St. Petersburg) and personally to the General Director Natalia Roshchina for providing samples of dust and windproof screens.

For citation: Denis N. Kostyunichev, Nikolay S. Otdelkin, Igor V. Lipatov, Danila O. Zimenkov, Victor S. Naumov Evaluation of the effectiveness of dust and wind shields in laboratory conditions. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 121—126. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.067

Введение

В последнее время для борьбы с пылением на открытых складах портовых грузовых районов и терминалов стали применяться пыле-ветрозащитные экраны как мягкого, так и жесткого типов [1], [3], [6]. Они уже получили определенное распространение в ряде Российских портов Приморского края и за рубежом (Канаде, Китае). Пыле-ветрозащитные экраны устанавливаются по периметру грузовых районов и терминалов, на которых перегружаются навалом и хранятся на открытых складах сыпучие грузы, склонные к пылеобразованию.

Причем, согласно исследованиям [4] и [5] эффективность жестких пыле-ветрозащитных экранов достигает 80%, в работах [2] и [3] утверждается, что эффективность данных экранов не превышает 20%, а в работах [7] и [8] – от 40 до 60%.

В связи с этим, целью данной работы является оценка эффективности жестких пыле-ветрозащитных экранов отечественного производства в лабораторных условиях.

Задачами исследования являются:

1) определение зависимости эффективности пыле-ветрозащитного экрана от скорости набегающего на него ветрового потока;

2) влияние параметров экрана на эффективность его работы по снижению скорости ветровых потоков.

В качестве основных параметров пыле-ветрозащитных экранов предлагается использовать такие параметры, как коэффициент $K_{пр}$ проницаемости и коэффициент $K_{ж}$ жесткости экрана.

Коэффициент $K_{пр}$ проницаемости экрана определялся по формуле

$$K_{пр} = \frac{S_{п}}{S_{о}}, \quad (1)$$

где $S_{п}$ - полная площадь проекции на плоскость образца экрана, m^2 ;

$S_{о}$ - площадь отверстий и вырезов образца экрана, m^2 .

Коэффициент $K_{ж}$ жесткости экрана, учитывающий его плоскостность, находился из выражения

$$K_{ж} = \frac{l_{п}}{l_{ж}}, \quad (2)$$

где $l_{п}$ - расстояние по прямой между крайними точками образца в поперечном сечении, м;

$l_{ж}$ - расстояние между крайними точками образца в поперечном сечении по контуру ребер жесткости, м.

Схема замеров расстояний $l_{п}$ и $l_{ж}$ для определения коэффициента $K_{ж}$ представлена на рис. 1.

Образцы жестких пыле-ветрозащитных экранов, выпускаемые ООО «РИД» (Россия) и используемые в экспериментальных исследованиях, приведены на рис. 2, а их параметры представлены в табл. 1.

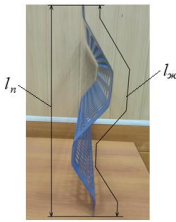


Рис. 1. Схема замеров расстояний $l_{п}$ и $l_{ж}$ для определения коэффициента $K_{ж}$.



Рис. 2. Образцы жестких пыле-ветрозащитных экранов, используемые в экспериментальных исследованиях.

Таблица 1

Образцы жестких пыле-ветрозащитных экранов и их параметры

№ образца	Параметры экрана	
	Коэффициент $K_{пр}$ проницаемости	Коэффициент $K_{ж}$ жесткости
1	3,03	1,12
2	3,29	1,06
3	3,21	1,06
4	2,63	1,04
5	3,11	1,09

Оборудование, использованное для проведения экспериментальных исследований жестких экранов, представлено на рис. 3.

а) общий вид оборудования



б) элементы оборудования



Рис. 3. Оборудование, использованное для проведения экспериментальных исследований жестких экранов.

Экспериментальное оборудование включает в себя воздуходувку Daewoo DABL 3000E 1, анемометры цифровые 2 марки UNI-T UT363, устройство рамочное 3 и ленту размерную 4.

Воздуходувка на выходе из сопла создает воздушный поток со скоростью до 30 м/с. Рамочное устройство (см. рис. 4) состоит из основания 1, к которому прикреплены три вертикальных панели 2, расположенных на расстоянии друг от друга 250 мм. Каждая панель 2 имеет раскос 3 для создания жесткости панели и простоты установки анемометра в центре панели.

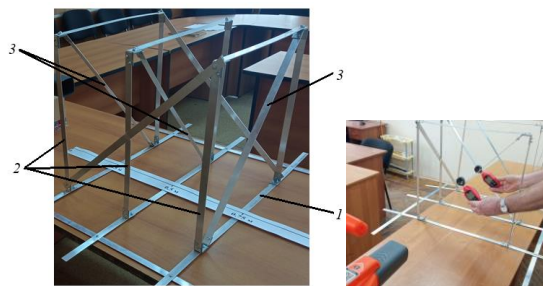


Рис. 4. Устройство рамочное.

Скорость ветрового потока измерялась цифровыми анемометрами с погрешностью измерения 3%.

Лента размерная от 0 до 3 м с шагом 250 мм служила для установки рамочного устройства на определенном расстоянии от сопла воздуходувки.

Определение зависимости эффективности пыле-ветрозащитного экрана от скорости набегающего на него ветрового потока

Эффективность пыле-ветрозащитного экрана от скорости набегающего на него ветрового потока оценивалась величиной разницы между значением ветрового потока без препятствия, то есть без экрана, и скорости потока с экраном. Иными словами, сначала измерялись скорости v_0 ветровых потоков без экранов, а затем - скорости потоков с экранами.

Исследования проводились по следующей методике.

Воздуходувка устанавливалась таким образом, чтобы ось выходного сопла воздуходувки совпадала с горизонтальной продольной осью панелей рамочного устройства (см. рис. 2, а). Сначала рамочное устройство располагалось таким образом, чтобы расстояние между первой панелью и соплом воздуходувки составляло 250 мм. В этом случае, две следующие панели рамочного устройства займут положение, соответственно, на расстоянии 500 и 750 мм от сопла воздуходувки.

Затем в работу включалась воздуходувка, которая на выходе из сопла создавала ветровой поток со скоростью 18,2 м/с, а в центр первой панели помещался анемометр и измерялась скорость ветрового потока на расстоянии 250 мм от сопла воздуходувки. Аналогичные замеры скорости проводились поочередно в двух других панелях.

После этого, рамочное устройство переносилось в следующее положение, при котором первая панель располагалась от сопла воздуходувки на расстоянии 1000 мм, а последующие панели – на расстоянии 1250 и 1500 мм. При таком положении рамочного устройства в центре каждой панели опять замерялись скорости ветрового потока.

Такие же замеры проводились при расположении первой панели рамочного устройства на расстоянии от сопла 1750 мм и 2500 мм.

Результаты выполненных замеров представлены в табл. 2.

Исследования взаимодействия воздушных потоков с различными образцами пыле-ветрозащитных экранов проводились по следующей методике.

Сначала рамочное устройство располагалось таким образом, чтобы первая панель (ближняя к воздуходувке) находилась на расстоянии 250 мм от выходного сопла воздуходувки. В первой панели располагался жесткий экран с определенными параметрами, в работу включалась воздуходувка, которая на выходе из сопла создавала ветровой поток со скоростью 18,2 м/с, и измерялась скорость ветрового потока анемометром в центре панели перед экраном $v_п$ и после экрана $v_з$. После этого, исследуемый образец экрана помещался сначала во вторую, потом в третью панель рамочного устройства и замерялись соответствующие скорости. Установка жестких экранов в панелях рамочного устройства показана на рис. 5.

Образец №1

Образец №2



Рис. 5. Установка жестких экранов в панелях рамочного устройства.

Затем, рамочное устройство переносилось в следующее положение, при котором первая панель располагалась от сопла воздуходувки на расстоянии 1000 мм и так же, как и в предыдущем случае выполнялись аналогичные замеры скорости.

Такие же замеры проводились при расположении первой панели рамочного устройства на расстоянии от сопла 1750 мм и 2500 мм.

Таблица 2

**Результаты замеров скорости v_0 ветрового потока без пыле-ветрозащитных экранов
в зависимости от удаленности точки замера скорости**

Удаленность точки замера скорости от сопла воздушной струи, м	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
Скорость ветрового потока v_0 , м/с	12,1	8,6	6,8	5,8	4,9	4,3	3,7	3,3	3,1	2,6	2,5	2,5

Таблица 3

Результаты исследования взаимодействия воздушных потоков с различными образцами пыле-ветрозащитных экранов

v_0 , м/с	Образец жесткого экрана									
	№1		№2		№3		№4		№5	
	$v_{п1}$, м/с	$v_{з1}$, м/с	$v_{п2}$, м/с	$v_{з2}$, м/с	$v_{п3}$, м/с	$v_{з3}$, м/с	$v_{п4}$, м/с	$v_{з4}$, м/с	$v_{п5}$, м/с	$v_{з5}$, м/с
12,1	6,0	4,6	9,7	2,7	9,8	2,6	8,2	3,9	9,5	2,4
8,5	10,0	6,1	7,1	2,9	7,2	2,9	7,6	3,8	7,0	2,7
6,8	5,4	4,0	5,4	2,6	5,3	2,4	4,4	3,4	5,1	2,2
5,8	4,2	3,4	4,4	2,3	4,4	2,4	4,0	3,0	4,3	2,2
4,9	3,8	3,0	3,7	2,1	3,6	2,0	3,8	2,9	3,5	2,0
4,3	3,1	2,7	3,0	1,9	3,1	1,9	2,8	2,8	3,0	1,7
3,7	2,7	2,4	2,5	1,8	2,6	1,9	2,3	2,8	2,4	1,6
3,3	2,5	2,1	2,3	1,7	2,3	1,5	2,0	2,5	2,1	1,3
3,1	2,2	1,9	2,1	1,6	2,2	1,6	1,8	2,2	2,0	1,3
2,6	2,0	1,7	2,0	1,5	2,0	1,4	1,6	2,2	1,8	1,3
2,5	1,85	1,6	1,9	1,4	2,0	1,3	1,6	1,9	1,8	1,1
2,5	1,6	1,5	1,6	1,4	1,8	1,2	1,4	1,9	1,7	1,0

Каждый образец жесткого экрана исследовался по приведенной выше методике.

Результаты исследования взаимодействия воздушных потоков с различными образцами пыле-ветрозащитных экранов приведены в табл. 3.

Влияние параметров экрана на эффективность его работы по снижению скорости ветровых потоков

Для оценки эффективности пыле-ветрозащитных экранов с различными параметрами предлагается использовать коэффициенты $K_{п}$ и $K_{з}$.

Коэффициент $K_{п}$ учитывает способность экрана по снижению скорости набегающего на экран потока перед экраном и определяется из выражения

$$K_{п} = \frac{v_0}{v_{п}}, \quad (3)$$

где $v_{п}$ - скорость ветрового потока перед экраном, м/с;

Коэффициент $K_{з}$ учитывает способность экрана по снижению скорости набегающего на экран потока за экраном (теневая сторона экрана), и определяется по формуле

$$K_{з} = \frac{v_0}{v_{з}}, \quad (4)$$

где $v_{з}$ - скорость ветрового потока за экраном, м/с.

Зависимости коэффициентов $K_{п}$ и $K_{з}$ от скорости v_0 ветрового потока, набегающего на экран представлены, соответственно, на рис. 6 и рис. 7.

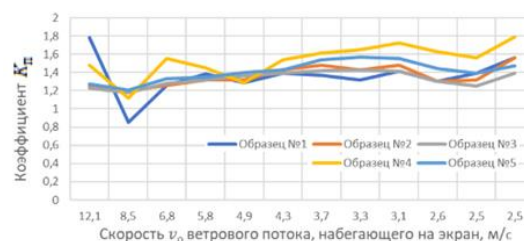


Рис. 6. Зависимость коэффициента $K_{п}$ от скорости v_0 ветрового потока, набегающего на экран.

Из данных рис. 6 можно сделать вывод, что с увеличением скорости набегающего потока с 2,5 м/с до 12,1 м/с его скорость с фронтальной стороны экрана снижается незначительно в 1,3...1,6 раза.

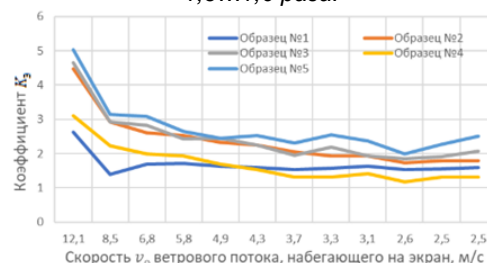


Рис. 7. Зависимость коэффициента $K_{з}$ от скорости v_0 ветрового потока, набегающего на экран.

Зависимости рис. 7 показывают, что все образцы исследуемых экранов снижают скорость ветрового потока с теневой стороны от двух до четырех раз. При чем, эффективность экранов растет с увеличением скорости v_0 набегающего потока.

Результаты исследований влияния проницаемости экрана на снижение скорости ветровых потоков представлены на рис. 8, а влияние жесткости экрана, то есть его не плоскостности - на рис. 9.

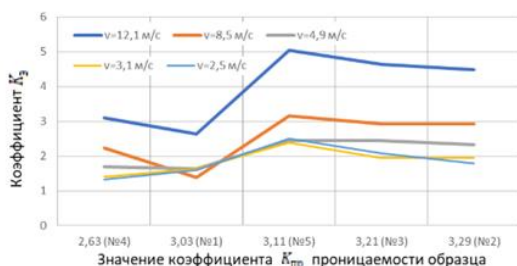


Рис. 8. Зависимость коэффициента K_z от коэффициента $K_{пр}$ проницаемости экрана.

Из графиков рис. 8 следует, что образцы экранов №4 и №1 позволяют снизить скорость набегающего потока с теневой стороны экрана в среднем в 1,8...1,9 раз, а образцы №5, №3 и №2 - в 3,1...2,8 раз.

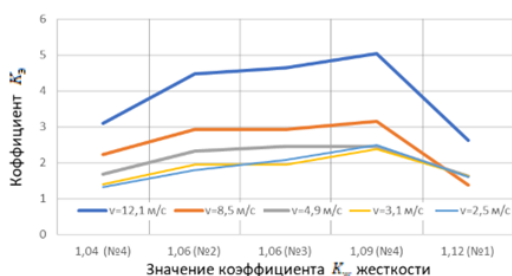


Рис. 9. Зависимость коэффициента K_z от коэффициента $K_{ж}$ жесткости экрана.

Зависимость коэффициента K_z от коэффициента $K_{ж}$ жесткости экрана, представленная на рис. 9 показывает, что при значениях $K_{ж} = 1,06...1,09$ для образцов №2, №3 и №4 имеет место максимальная эффективность этих образцов по снижению скорости ветрового потока за экраном.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) жесткие пыле-ветрозащитные экраны позволяют значительно снижать скорости ветровых потоков, взаимодействующих с ними, а следовательно уменьшать запыленность и пылеунос;

2) предложенная в статье экспериментальная методика позволяют оценить эффективность жестких пыле-ветрозащитных экранов с учетом их параметров и скоростей взаимодействующих с ними ветровых потоков;

3) полученные зависимости коэффициента $K_{пр}$ (см. рис. 6), и коэффициента K_z (см. рис. 7) и коэффициента $K_{ж}$ от скорости v_0 ветрового потока, набегающего на экран, а также зависимости коэффициентов $K_{пр}$ и $K_{ж}$ от K_z позволяют оценить эффективность работы каждого образца жесткого экрана в интервале скоростей ветрового потока от 2,5 м/с до 12,1 м/с;

Литература

1. Голохваст К.С. Экологическое состояние малых населенных пунктов Дальнего Востока России по данным микрогазового загрязнения атмосферы / К.С. Голохваст, П.А. Никифоров, В.В. Чайка, Н.Г. Остапенко, С.А. Разгонова, Я.Ю. Блиновская, В.В. Слесаренко, Ю.С. Дорошев, Н.В. Земляная, А.А. Фаткулин, А.И. Агошков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. Т. 16. N 1-3. - С. 624-627.
2. Голохваст К.С. Первые данные по вещественному составу атмосферных взвесей Владивостока / К.С. Голохваст, И.Ю. Чекрызов, А.М. Паничев, П.Ф. Кику, Н.К. Христофорова, А.Н. Гульков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. Т. 13. № 1-8. - С. 1853 - 1857.
3. Раевич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения / Проблемы прогнозирования. - 2010. - N 4. - С. 87-99.
4. Кожевникова О.М., Москвитина И.В. Проблемы борьбы с пылью на морских угольных терминалах / О.М. Кожевникова, И.В. Москвитина // научный журнал «GLOBUS»; Технические науки. - N 3(39). - 2021. - С. 25-36.
5. Балашова А.А. Особенности использования угля в Китае и возможные пути снижения негативного воздействия на окружающую среду // Нац. интересы: приоритеты и безопасность. - 2010. - N 5. - С. 92-96.
6. Мазуренко О.И. Оценка мирового опыта оснащения и эксплуатации экспортных перегрузочных комплексов по перевалке угля в морских портах // Научное обозрение. Технические науки. - 2020. - N 5. - С. 48-57.
7. Костюничев Д.Н. Экспериментальный метод определения количественных характеристик потерь сыпучих грузов при перегрузке грейфером / Д.Н. Костюничев, Н. С. Отделкин, Д.О. Зименков // Научные проблемы водного транспорта. - 2023. - N 76(3). - С. 210-218.
8. Отделкин, Н. С., Костюничев Д. Н. Эколого-экономическое обоснование параметров открытых складов навалочных грузов путем прогнозирования процесса пылеуноса. // «Экологические системы и приборы». 2005. N 1. С. 30-33.

References

1. Golokhvast K.S., Nikiforov P.A., Chaika V.V. and ets. Ecological state of small settlements of the Russian Far East apaportocnaccording to micro-dimensional atmospheric pollution data Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2014. Vol. 16. № 1-3. - p. 624 - 627.

2. Golokhvast K.S. and ets. The first data on the material composition of atmospheric suspensions of Vladi-Vostok . Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. - 2011. Vol. 13. No. 1-8. - pp. 1853 - 1857.
3. Raevich B.A. To assess the impact of fuel and energy sector activities on the quality of the environment and the health of the population. Problems of forecasting. - 2010. - No. 4. – pp. 87-99.
4. Vasina D., Rapoport I., Teslenko I. Solving environmental problems of Vladivostok coal terminals. International journal of Professional Science 2021. - No. 6. – pp. 27-35.
5. Epstein S.A., Gavrilova D.I., Zavelev I.G., Shamshin S.A., Yurin E.Yu. Experience of using polymer emulsion to reduce coal dusting during their movement // Mining information and analytical bulletin. 2019. No.10. p.5 – 15. DOI:10.25018/0236-1493-2019-10-0-5-15.
6. Kozhevnikova O.M., Moskovaya I.V. Problems of dust control at offshore coal terminals. Scientific journal "GLOBUS"; Technical sciences. №3(39). 2021. Pp. 25-36.
7. Balashova A.A. Features of coal use in China and possible ways to reduce the negative impact on the environment // Nats. interests: priorities and security. 2010. No. 5. pp.92-96.
8. Mazurenko O.I. Evaluation of the world experience in equipping and operating export transshipment complexes for coal transshipment in seaports. Scientific Review. Technical sciences. 2020. No. 5. pp. 48-57.
9. Kostyunichev D.N., Otdelkin N.S., Zimenkov D.O. Experimental method for determining the quantitative characteristics of losses of bulk cargo during reloading with a grab. Scientific problems of water transport. 2023. №. 76(3). pp. 210 – 218.
10. Otdelkin N. S., Kostyunichev D. N. Ecological and economic justification of the parameters of open warehouses of bulk cargo by predicting the process of dust removal. "Ecological systems and devices", №. 1, 2005, pp. 30-33.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Костюничев Денис Николаевич, кандидат технических наук, доцент, проректор ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». 603950, Российская Федерация, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: kostyunichev.dn@vsuwt.ru

Denis N. Kostyunichev - Ph.D. (Eng), assistant professor, vice-rector Volzhsky State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., N. Novgorod, 603950, Russian Federation. e-mail: kostyunichev.dn@vsuwt.ru

Отделкин Николай Станиславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». 603950, Российская Федерация, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5., e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Nikolay S. Otdelkin - Dr. Sci. (Eng), professor, head of the department Volzhsky State University of Water Transport. Nesterova Str., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Липатов Игорь Викторович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». 603950, Российская Федерация, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: ilipatov45@gmail.com

Igor V. Lipatov Dr. Sci. (Eng), assistant professor, Volzhsky State University of Water Transport. 5. Nesterova Str., N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: ilipatov45@gmail.com

Зименков Данила Олегович – аспирант ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». 603950, Российская Федерация, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5, e-mail: danila_zimenkov@mail.ru

Danila O. Zimenkov –graduate student, Volzhsky State University of Water Transport. 5. Nesterova Str., N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: danila_zimenkov@mail.ru

Наумов Виктор Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nauvs@mail.ru

Victor S. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: nauvs@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024

Научная статья

УДК 656.6:658.512:51-74

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.068>

Применение моделей рейсового планирования работы речных судов на производстве и в тренажерных системах

Платов А.Ю.¹ platoff@mail.ru, Платов Ю.И.² platov_ji@mail.ru, Никулина М.В.² marina_platnik@rambler.ru,
Прокопенко А.С.² prokopenko.rower@mail.ru

¹Нижегородский архитектурно-строительный университет,

²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Целью работы является представление математических моделей оптимального рейсового планирования времени движения и расхода топлива для речных судов. На основе опыта их применения в течение длительного времени в составе различных АРМ в судоходных предприятиях эти модели были существенно доработаны. Впервые приводятся модели оптимального планирования работы речного флота, обеспечивающие комплексную оптимизацию для необходимого числа круговых рейсов. Использование рассматриваемых моделей позволит расширить сферу их применения в производстве в условиях цифровизации отрасли речного транспорта и в тренажерных системах, которые могут использоваться не только для учебных целей, но и для решения практических задач. В связи с этим представляемые модели становятся неотъемлемой частью эксплуатационных тренажеров, для полноценного функционирования которых требуется приводимая в работе методика оценки вырабатываемых оптимальных решений. Широкое применение предлагаемых моделей в условиях цифровизации отрасли становится неизбежным и будет способствовать повышению эффективности перевозок грузов речным транспортом.

Ключевые слова: модели оптимального рейсового планирования, эксплуатационный тренажер, оценка принимаемых решений

Для цитирования: Платов А.Ю., Платов Ю.И., Никулина М.В., Прокопенко А.С. Применение моделей рейсового планирования работы речных судов на производстве и в тренажерных системах. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 127—132. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.068

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.068>

Application of models of voyage planning of river ships in business and in training systems

Alexander J. Platov ¹ platoff@mail.ru, Juri I. Platov ² platov_ji@mail.ru,
Marina V. Nikulina² marina_platnik@rambler.ru, Andrej S. Prokopenko² prokopenko.rower@mail.ru

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, ²Volga State University of Water Transport

Abstract. The aim of the work is to present mathematical models of optimal voyage planning of travel time and fuel consumption for river ships. Based on the experience of their long-term use as part of various information systems in shipping companies, these models have been significantly improved. For the first time, models of optimal planning of the river fleet are presented, providing comprehensive optimization for the required number of round trips. The use of the models under consideration will expand the scope of their application in production in the context of digitalization of the river transport industry and in simulator systems that can be used not only for educational purposes, but also for solving practical problems. In this regard, the presented models are becoming an integral part of operational simulators, for the full functioning of which the methodology for assessing the optimal solutions generated is required. Wide application of the proposed models in the context of digitalization of the industry is becoming inevitable and will contribute to increasing the efficiency of cargo transportation by river transport.

Key words: models of optimal voyage planning, operational simulator, evaluation of decisions

For citation: Alexander J. Platov, Juri I. Platov, Marina V. Nikulina, Andrej S. Prokopenko, Application of models of voyage planning of river ships in business and in training systems. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 127—132. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.068

Введение

Востребованность экономико-математических моделей (ЭММ) возрастает в связи с предполагаемой цифровизацией отрасли [1,2]. Составной и органической частью является оптимизация принятия решений по управлению перевозками грузов и работой флота. Применение рейсовых ЭММ, как показывает современная практика, предоставляет судоходным предприятиям (СП) большие возможности повышения адекватности

планирования, нормирования, оптимизации расхода топлива судами и других эксплуатационных расходов и увеличения доходов [3,4,5,6,7]. Другим направлением более широкого применения рейсовых моделей является их использование в эксплуатационных тренажерах, созданных на основе современных информационных технологий (ИТ), которые позволяют не только существенно повышать эффективность обучения студентов, аспирантов, специалистов по эксплуатации флота, но и решать исследовательские научные проблемы,

производственные задачи судоходных предприятий, демонстрировать возможности эффективного управления работой флота в условиях использования цифровых технологий, обеспечивающих оптимальность и поддержку принятия решений [8]. В обоих направлениях рейсовые модели могут встраиваться в различные автоматизированные рабочие места (АРМ), использоваться в составе имитационных моделей и в системах оперативного планирования работы флота.

Поэтому системное описание особенностей применения моделей в разных приложениях с учетом их модернизации на основе практического опыта их использования, а также количественной оценки оптимальных вырабатываемых решений в тренажерных системах, имеет наиважнейшее значение. По нашему мнению, систематизация использования моделей расширит в перспективе сферу их использования, не только в тренажерных системах, но и в практической деятельности, что, в свою очередь, будет содействовать поддержанию конкурентоспособности речных перевозок грузов.

Описание сферы использования моделей

Первое системное описание и теоретическое обоснование нескольких нелинейных моделей выбора оптимального режима движения отдельных судов и составов, предназначенных для рейсового планирования и регулирования, было сделано в работе [6]. Общим для них является то, что оптимизация осуществляется с учетом всех значимых характеристик судов и условий плавания по участкам водных путей. Принципиальной является взаимосвязь между временем движения судна и расходом топлива главными двигателями, то есть, комплексность и системность нормирования.

Наиболее важными являются три модели выбора режима движения: по заданному времени прибытия, движение с минимальными эксплуатационными затратами и максимальной среднесуточной прибылью. Применение той или иной модели выбора режима движения зависит от эксплуатационных ситуаций, свойств груза и других факторов. Эти модели были использованы в практической деятельности нескольких СП в составе АРМ рейсового планирования доходов и расходов, в том числе для рейсового нормирования ходового времени и расхода топлива [3,4,5,6,7]. На основе этих моделей впервые были рассчитаны комплексные нормы времени движения и расхода топлива по всем участкам водных путей Европейской части России для нефтеналивного флота. Модель выбора режима движения по заданному времени прибытия долгое время использовалась в Волжском пароходстве для определения расхода топлива пассажирскими судами, работающими по расписанию. Опыт их успешного применения показал возможность более широкого их использования на разных уровнях планирования и регулирования работы флота в производственной деятельности СП и в эксплуатационных тренажерах [8,9,10,11]. В зависимости от целей и ситуаций в каждом конкретном случае может применяться одна из трех упомянутых моделей оптимизации или любые их комбинации. Например, при нормировании оборота, который включает в себя последовательность

груженого и порожнего или порожнего и груженого рейсов, может применяться комбинация из двух моделей: для порожнего рейса – по заданному моменту прибытия судна, а для груженого – оптимизации прибыли.

Для текущего планирования работы флота нами предлагается модель нормирования ходового времени и расхода топлива как для одного кругового рейса (оборота), так и для нескольких. На основе этой модели определяются потребность во флоте и соответствующие эксплуатационные расходы.

Для всех названных моделей используются следующие общие ограничения:

$$t_k^{\min} \leq t_k^x \leq t_k^{\max}, \quad (1)$$

$$t_k^{\min} = f(\vec{s}, \vec{w}), \quad t_k^{\max} = f(\vec{s}, \vec{w}), \quad (2)$$

где $t_k^{\min}, t_k^{\max}, t_k^x$ – соответственно, минимальное, максимальное и искомое ходовое время на каждом k -ом элементарном участке водного пути, ч;

$\vec{s}, \vec{w}$ – соответственно, параметры судна (ограничительные характеристики и устойчивость работы главных двигателей, величина динамической просадки корпуса, условия управляемости) и водных путей (правила плавания по водным путям, величины потерь и приращений скоростей течения и т.д.), определяющих максимальную и минимальную скорости движения судна [6].

С учетом (1), (2) и корректив, внесенных на основании опыта их использования на практике, а также перспектив их применения в эксплуатационных тренажерах, перечисленные выше модели принимают следующий вид.

По заданному времени прибытия:

$$\sum_{k=1}^N G_k \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N t_k^x = T_3^p - \Delta t_p - \sum_{k=1}^N t_k^{ct}, \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^N t_k^x \leq T_3^p - \sum_{k=1}^N t_k^{ct}, \quad (5)$$

где G_k – соответственно, расход топлива главными двигателями (ГД) на каждом k -ом элементарном участке водного пути, кг;

t_k^x – ходовое время на каждом k -ом элементарном участке водного пути, ч;

N – число элементарных участков водного пути, ед.;

T_3^p – продолжительность заданного времени груженого или порожнего рейса, ч;

Δt_p – время резерва, задаваемое специалистом в зависимости от ситуаций и уровня планирования, ч;

t_k^{ct} – продолжительность простоев судна на каждом k -ом участке водного пути, включая все технологические операции в начальном и конечном пунктах, ч.

Минимизация эксплуатационных расходов:

$$\Pi_T \sum_{k=1}^N G_k + r_c \sum_{k=1}^N t_k^x \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^N t_k^x \leq T_3^p - \sum_{k=1}^N t_k^{ct}, \quad (7)$$

где Π_T – цена топлива для ГД, руб./кг;

r_c – условно-постоянные расходы, без учета расходов на топливо и смазку, навигационных сборов за прохождение внутренних водных путей, портовых и канальных сборов и прочих прямых, руб./ч.

Ограничения (5) и (7) идентичны и не являются обязательными для других моделей.

Максимизация среднесуточной прибыли:

$$\frac{Q_3 f_r - \Pi_T \sum_{k=1}^N G_k - c_{вп} - c_{пкс} - c_{ппр}}{\sum_{k=1}^N t_k^x + \sum_{k=1}^N t_k^{ct}} \rightarrow \max, \quad (8)$$

где Q_3 – эксплуатационная загрузка судна, т;

f_r – фрахтовая ставка, руб./т;

$c_{вп}$ – сумма навигационных сборов за прохождение внутренних водных путей, руб.;

$c_{пкс}$ – сумма портовых и канальных сборов, руб.;

$c_{ппр}$ – прочие прямые расходы, руб.

Опыт использования модели максимизации среднесуточной прибыли (8) показывает, что при ставках фрахта, существенно превышающих себестоимость перевозок грузов, оптимальным будет движение судна с максимальной скоростью, а экономия расхода топлива и смазки будет достигаться только за счет переопределения скоростей движения по участкам водных путей. Максимизации среднесуточной прибыли можно достичь и с помощью первой модели – при задании времени движения, меньше минимального. При ставках фрахта, близких к себестоимости перевозок грузов, скорости движения снижаются и тем больше, чем выше цена топлива, больше портовые и канальные сборы, а также при большем удельном весе в продолжительности рейса судна стоянок в пути и в пунктах обработки. Снижение скоростей движения судов также можно использовать и при определении потребности во флоте, что будет показано ниже.

При текущем и оперативном планировании работы флота расчетной единицей является оборот, круговой рейс или их совокупность. В этой ситуации возможно использование только модели максимизации среднесуточной прибыли по всей совокупности оборотов или рейсов:

$$\frac{\sum_{s=1}^M Q_{3s} f_{rs} - \Pi_T \sum_{s=1}^M G_s - \sum_{s=1}^M c_s^{вп} - \sum_{s=1}^M c_s^{пкс} - \sum_{s=1}^M c_s^{ппр}}{\sum_{s=1}^M (T_s^x + T_s^{ct})} \rightarrow \max, \quad (9)$$

$$t_{sk}^{min} \leq t_{sk}^x \leq t_{sk}^{max}, \quad (10)$$

$$t_{sk}^{min} = f(\vec{s}, \vec{w}), t_{sk}^{max} = f(\vec{s}, \vec{w}), \quad (11)$$

где M – число груженых и порожних s -х рейсов, ед.;

Q_{3s} – эксплуатационная загрузка судна в s -ом груженом рейсе, т;

f_{rs} – фрахтовая ставка в s -ом груженом рейсе, руб./т;

G_s – расход топлива ГД в каждом s -ом груженом или порожнем рейсе, кг;

$c_s^{вп}, c_s^{пкс}, c_s^{ппр}$ – условно постоянные и прочие прямые расходы в каждом s -ом груженом или порожнем рейсе, руб.;

T_s^x, T_s^{ct} – соответственно, общее ходовое и стояночное время в каждом s -ом груженом или порожнем рейсе, ч;

$t_{sk}^{min}, t_{sk}^{max}, t_{sk}^x$ – соответственно, минимальное, максимальное и искомое ходовое время на k -ом элементарном участке водного пути в каждом s -ом груженом или порожнем рейсе, ч;

$$c_s^{вп} = r_c (T_s^x + T_s^{ct}), \quad c_s^{пкс} = c_s^{пкс} + c_s^{пкс} + c_s^{ппр}, \quad (12)$$

$$T_s^x = \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N t_{sk}^x, \quad T_s^{ct} = \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N t_{sk}^{ct}, \quad (13)$$

$$G_s = \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N G_{sk}. \quad (14)$$

Оценка оптимальных решений в тренажерных системах

Основными оценочными показателями вырабатываемых оптимальных решений являются доходы и эксплуатационные расходы. Если определение доходов не вызывает каких-то методических трудностей, то с эксплуатационными расходами все обстоит иначе и в разных задачах необходимо использовать разные методики. Так, в рамках ИТ для практических целей они более точно рассчитываются по методике [11]. В данной статье приводится вариант укрупненной методики расчета применительно к использованию в тренажерных системах и даются некоторые особенности её применения в практических расчетах.

В соответствии с этой методикой, расходы в каждом груженом и порожнем рейсах определяются по следующему выражению:

$$C_p = c_{упр} + c_{тс} + c_{вп} + c_{пкс} + c_{ппр}, \quad (15)$$

где C_p – сумма прямых расходов в груженом или порожнем рейсе, руб.

$c_{упр}, c_{тс}, c_{вп}, c_{пкс}, c_{ппр}$ – соответственно, рейсовые расходы: условно-постоянные, по топливу и смазке, навигационные сборы за прохождение внутренних водных путей, портовые и канальные сборы и прочие прямые, которые рассчитываются по следующим выражениям, руб.:

$$c_{упр} = r_c (\sum_{k=1}^N t_k^x + \Delta t_p + \sum_{k=1}^N t_k^{ct}), \quad (16)$$

$$c_{тс} = ((\sum_{k=1}^N G_k + G_{п}) \Pi_T + (T_s^x + T_s^{ct}) (g_{в} + g_{охб}) \Pi_{в}) k_c, \quad (17)$$

где $G_{п}$ – рейсовый расход топлива на поддержание температуры высоковязких нефтегрузов, кг;

где $g_{в}, g_{охб}$ – соответственно, рейсовый расход топлива при выгрузке для танкеров и отопление и хозяйственные нужды, кг/ч;

$\Pi_{в}$ – цена топлива для вспомогательных двигателей, руб./кг;

k_c – коэффициент, учитывающий расходы на смазочные материалы от величины расходов на топливо;

$$c_{вп} = V_y \sum_{k=1}^N (c_k l_k) 10^{-3}, \quad (18)$$

где V_y – условный кубический модуль судна, м³;

c_k – ставка навигационного сбора за прохождение k -го элементарного участка водного пути, руб. за 1000 м³/км;

l_k – длина k -го элементарного участка водного пути, км.

Для одиночных судов, буксиров, толкачей и составов V_y рассчитывается, соответственно, по следующим выражениям:

$$V_y^0 = L \cdot B \cdot H; \quad V_y^c = \sum_2^m V_y^0, \quad (19)$$

где L, B, H – габаритные длина, ширина и высота борта судна, м;

m – число судов в составе, ед.

Значения величин $t_k^{CT}, G_p, g_v, g_{oxb}, \Pi_{TT}, \Pi_{TD}, k_c, V_y, c_k, l_k, c_{пкс}, c_{ппр}, r_{ij}$ выбираются из соответствующих баз данных. При этом значения величин G_p, g_v для порожних рейсов танкеров и всех сухогрузных судов равны нулю, а некоторые другие временные затраты и прямые расходы в зависимости от характера рейса могут быть равными нулю.

Значение величины G_k при реализации модели определяется по алгоритмам, приведенным в [6]. При наличии оптимальных нормативов ходового времени и расхода топлива [4,5] с определенной погрешностью она находится по следующему выражению:

$$G_k = \sum_{k=1}^N B_k \frac{(t_k^{min})^3}{(t_k^2)^2}, \quad (20)$$

где B_k – часовой расход топлива ГД на каждом k -ом элементарном участке водного пути при минимальном времени движения, кг/ч.

На основе вычисленной продолжительности кругового рейса и расхода топлива главными двигателями определяются все необходимые показатели: число возможных отправок, потребность во флоте, измерители работы флота, эксплуатационные расходы по необходимым статьям, в том числе расходы по топливу и смазке. Первичные параметры могут определяться как известными классическими методами, так и путем моделирования в рамках ИТ. Так, если круговой рейс рассматривается для средних навигационных условий плавания, то потребность во флоте определяется классическим способом. Если рейсы рассчитываются за навигационный период планирования для разных условий плавания, то выстраивается цепочка последовательности рейсов по каждому судну, от момента ввода до момента вывода судна из эксплуатации. В этом случае более точно определяются все показатели, в том числе и резервы.

Обсуждение применимости моделей на практике и в тренажёрных системах

Описанные выше модели являются универсальными для применения для разных уровней планирования и регулирования работы флота, нормирования ходового времени и расхода топлива.

Использование модели по заданному времени осуществляется в условиях, когда на момент планирования и регулирования определено время или «окно» прибытия судна, в соответствии с заключенными договорами [9], или прогнозируется простой судна в пункте прибытия. В этих ситуациях все прямые расходы, доходы и провозная способность судна останутся неизменными, но за счет снижения скорости движения судна достигается экономия расхода топлива, а, следовательно, и смазки.

Модель оптимизации эксплуатационных расходов целесообразно использовать при следующих практических и игровых (при функционировании тренажера) ситуациях:

а) если неизвестно время предъявления груза или при назначении судна в пункт вывода его из эксплуатации на зимний отстой, ремонт, когда время прибытия порожнего судна не является критичным;

б) в условиях перевозки грузов, «нетребовательных» к скорости доставки, например, длительного хранения в пунктах назначения, невысокой стоимости, а также при аренде судов и излишках флота на перевозках. При этом в большинстве таких ситуаций нет необходимости выдерживать норму ходового времени рейса и срок доставки груза, за некоторыми редкими исключениями.

Во всех ситуациях минимизируются все прямые расходы, включая и затраты на топливо.

При обосновании навигационных и оперативных планов кроме ситуаций, описанных выше, при нормировании ходового времени судов наиболее целесообразно применять модель максимизации среднесуточной прибыли.

Эта же модель может использоваться при регулировании потребности во флоте в условиях неравномерности перевозок грузов по периодам навигации. На практике при превышении наличия над потребностью суда выводятся из эксплуатации или простаивают в резерве до появления потребности в перевозках грузов. При обратной ситуации они вводятся в эксплуатацию из отстоя или резерва. Такое регулирование неизбежно приводит к определенным потерям, связанным с расходами на ввод и вывод судов. Снижение потерь возможно минимизировать на базе использования модели максимизации прибыли при искусственном подборе и задании фрахтовых ставок на уровне себестоимости перевозок для каждого кругового рейса, включающего один или несколько грузопотоков. В этом случае снижаются скорости движения и расходы на топливо ГД, но при этом искусственно увеличиваются потребность в судах и связанные с ней другие расходы. Таким способом формируется некий резерв судов, которые могут быть использованы при появлении потребности в перевозках.

Однако такое резервирование целесообразно в ситуации, когда излишки судов невозможно использовать на других перевозках. При этом для совокупности всех круговых рейсов должно выполняться следующее условие:

$$(G^{bn} - G^p) \Pi_T k_c \geq (T^{xp} - T^{x^{bn}})(r_c + (g_v + g_{oxb}) \Pi_b k_c), \quad (21)$$

где G^{bn}, G^p – соответственно, расход топлива за каждый круговой рейс, принятый за базовый (нормативный, без регулирования), и при регулировании наличия флота, кг;

$T^{xp}, T^{x^{bn}}$ – соответственно, продолжительность каждого кругового рейса при регулировании наличия флота и без регулирования (базовая, нормативная), ч.

В варианте с высокой вероятностью возможного вывода и последующего ввода судов в эксплуатацию предыдущее условие принимает следующий вид:

$$(G^{bn} - G^p) \Pi_T k_c \geq (T^{xp} - T^{x^{bn}})(r_c + (g_v + g_{oxb}) \Pi_b k_c) - C_{bv}, \quad (22)$$

где C_{bv} – нормируемые расходы на вывод и ввод судов в эксплуатацию, руб.

Последнее условие приводит к увеличению наличия флота по сравнению с предыдущим вариантом (21).

В ситуациях, когда излишки судов можно использовать на других перевозках, оптимизация, в том числе регулирование наличия флота на перевозках, становится целесообразной при выполнении следующего условия:

$$(G^{bn} - G^p) \Pi_T \geq (T^{xp} - T^{xbn}) \Pi_{cp}, \quad (23)$$

где Π_{cp} – среднесуточная прибыль, планируемая при эксплуатации судов на других участках, руб./ч.

При снижении скорости могут не выполняться договорные сроки доставки и грузовладелец понесет потери за счет увеличения оборотных средств или так называемого «связанного капитала». В этой ситуации возможен единственный выход: за счет экономии прямых расходов необходимо снизить фрахтовые ставки, чтобы компенсировать потери грузовладельцев.

В перспективе, в условиях планируемой цифровизации, описанные универсальные рейсовые

модели должны встраиваться в системы более высокого уровня: в имитационную модель тренажера [8] и в автоматизированные системы навигационного (текущего) и оперативного планирования работы речного флота [9].

Заключение

Приведенные нелинейные модели при использовании их в рамках ИТ и в различных тренажерных системах позволят существенно повысить качество принятия решений по управлению работой флота, а, следовательно, обеспечить эффективность перевозок грузов речным транспортом. Эта эффективность уже подтверждена практикой использования этих моделей. Однако такие ИТ применимы только в условиях высокой степени цифровизации и информационного обеспечения транспортного предприятия.

Литература

1. Распоряжение правительства от 28 июля 2017 г. № 1632-р. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71634878/>
2. Зубаков Г.В., Проценко О.Д. Цифровая платформа транспортного комплекса Российской Федерации. Некоторые аспекты реализации. Креативная экономика. 2019, Том 13, № 3, с. 407-420. doi: 10.18334/ce.13.3.40461
3. Малышкин А.Г., Платов А.Ю., Платов Ю.И., Смирнов С.Г. Система автоматизированного расчета норм времени следования и расхода топлива. Наука и техника на речном транспорте. ФГУП ЦБНТИ Минтранса РФ. М., 2003, с. 80-84.
4. ООО «Волготанкер АМС». Эксплуатационные нормы для планирования работы транспортного флота. Утверждены и введены в действие Приказом от 15 июля 2003г. N38/2о.д. Москва, 2003 г.
5. ООО «Волготанкер АМС». Нормы расхода топлива для планирования работы транспортного флота. Утверждены и введены в действие Приказом от 15 июля 2003г. N38/1о.д. Москва, 2003 г.
6. Платов А.Ю. Методология оперативного планирования работы речного грузового флота в современных условиях. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Н. Новгород, ВГАВТ, 2010, 193 с.
7. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Проблемы применения систем поддержки принятия решений на речном транспорте. Речной транспорт (XXI век). 2018, № 1 (85), с. 22-24.
8. Платов А.Ю., Платов Ю. И., Никулина М.В., Окунев С.И. Концепция разработки и использования диспетчерских и управленческих тренажеров на речном транспорте. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, 2018, № 56 (56), с. 164-169.
9. Платов А.Ю., Платов Ю.И. Концепция системы оперативного планирования отправления грузов из портов на внутренних водных путях. Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 71. Н. Новгород, Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2022, с.180-187.
10. Platov A. Platov J. Integrating Simulation Model as a Universal Approach to Continuous Planning of River Fleet Operation. Fleet Operation, 2022, Lecture Notes in Networks and Systems, 403 LNNS, с. 896-904 DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_99
11. Платов, Ю.И. Методические основы рейсового планирования работы флота. Труды ВГАВТ, вып.275. Н. Новгород, 1997, с. 63

References

1. Government Order of July 28, 2017 No. 1632-r.. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71634878/>
2. Zubakov G.V., Procenko O.D. Digital platform of the transport complex of the Russian Federation. Some aspects of implementation. Creative Economy. 2019, Vol. 13, No. 3, pp. 407-420. doi: 10.18334/ce.13.3.40461
3. Malyshkin A.G., Platov A.Ju., Platov Ju.I., Smirnov S.G. Automated system for calculating travel time and fuel consumption rates. Science and technology in river transport. FSUE TsBNTI of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow, 2003, pp. 80-84.
4. Volgotanker AMS, LLC. Operational Standards for Planning the Operation of the Transport Fleet. Approved and put into effect by the Order of July 15, 2003, N38/2о.д. Moscow, 2003
5. Volgotanker AMS, LLC. Fuel Consumption Standards for Planning the Operation of the Transport Fleet. Approved and put into effect by the Order of July 15, 2003, N38/1о.д. Moscow, 2003
6. Platov A.Yu. Methodology of Operational Planning of the River Cargo Fleet in Modern Conditions. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. N. Novgorod, VGAVT, 2010, 193 p.
7. Platov A.Yu., Platov Yu.I. Problems of Application of Decision Support Systems in River Transport. River Transport (XXI Century). 2018, No. 1 (85), pp. 22-24.

8. Platov A.Yu., Platov Yu.I., Nikulina M.V., Okunev S.I. The concept of development and use of dispatching and management simulators in river transport. Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport, 2018, No. 56 (56), pp. 164-169.
9. Platov A.Yu., Platov Yu.I. The concept of the operational planning system for the dispatch of cargo from ports on inland waterways. Scientific problems of water transport. Issue 71. N. Novgorod, Publishing house of FGBOU VO "VSUVT", 2022, pp. 180-187.
10. Platov A. Platov J. Integrating Simulation Model as a Universal Approach to Continuous Planning of River Fleet Operation. Fleet Operation, 2022, Lecture Notes in Networks and Systems, 403 LNNS, pp. 896-904 DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_99
11. Platov, Yu.I. Methodological Foundations of Voyage Planning of Fleet Operations. Proceedings of VSAT, issue 275. N. Novgorod, 1997, p. 63

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Платов Александр Юрьевич, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной информатики и статистики, Нижегородский архитектурно-строительный университет, 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, e-mail: platoff@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

Платов Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: platov1@yandex.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

Никulina Марина Владимировна, кандидат технических наук., доцент, доцент кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: marina_platnik@rambler.ru

Marina V. Nikulina, Ph.D. (Eng), assistant professor of Transport Management Chair, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5 e-mail: marina_platnik@rambler.ru

Прокопенко Андрей Сергеевич, аспирант кафедры управления транспортом, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: prokopenko.rower@mail.ru

Andrej S. Prokopenko, graduate student of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5 e-mail: prokopenko.rower@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 10.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 15.11.2024.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

Научная статья

УДК 004.942: 504.4.054

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.069>

Моделирование процессов распространения загрязнения технической солью при аварии судов

Домнина О.Л.¹ o-domnina@yandex.ru, Липатов И.В.¹ i_lipatov@mail.ru,

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Более половины всех перевозимых грузов составляют сухогрузы. При эксплуатации судов могут происходить аварии, последствием которых становится экологический вред окружающей среде. Этот вред может усугубляться различными химическими реакциями, в которые вступают сухие грузы с водой и фоновыми загрязнениями в ней. В данном исследовании был проведен анализ зарубежных и отечественных публикаций, связанных с авариями сухогрузов и моделированием распространения загрязнений. Была выявлена неизученная область распространения загрязнений от аварии сухогрузных судов в речном потоке с учетом химических реакций. Важность изучения этих вопросов связана с возможным наличием ниже по течению от мест аварий водозаборных сооружений, АЭС и др. объектов, на работу которых может оказывать негативное влияние не только попадающие в их зону опасные грузы, но и вещества, образующиеся в результате химических реакций. На основании ранее проведенных исследований с участием авторов, был выбран участок в районе 894 -900 км р. Волги с умеренным риском и сложной топологией поверхности русла. Моделирование распространения шлейфа загрязнения технической солью и образующихся в результате химических реакций веществ выполнялось с помощью программного комплекса Flow Vision. В качестве исходной была принята ситуация пробойны корпуса судна в результате его посадки на мель. Наличие информации о полях распределения вредоносных веществ в результате наступления моделируемой аварии дает возможность заблаговременно подготовиться к ней и провести комплекс превентивных мероприятий.

Ключевые слова: аварийный участок; моделирование распространения загрязнения; водный транспорт; химические реакции; техническая соль

Финансирование: исследование выполнен за счет средств Волжского государственного университета водного транспорта.

Для цитирования: Домнина О.Л., Липатов И.В., Моделирование процессов распространения загрязнения технической солью при аварии судов. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 133—141. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.069

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.069>

Modeling of the processes of spreading technical salt pollution in the event of a ship accident

Olga L. Domnina¹ o-domnina@yandex.ru, Igor V. Lipatov¹ i_lipatov@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Russian Federation

Abstract. More than half of all transported goods are bulk carriers. Accidents may occur during the operation of ships, the consequence of which is environmental damage to the environment. This harm can be aggravated by various chemical reactions involving dry cargo with water and background contamination in it. In this study, an analysis of foreign and domestic publications related to dry cargo accidents and pollution propagation modeling was carried out. An unexplored area of contamination from the accident of dry cargo ships in the river stream was identified, taking into account chemical reactions. The importance of studying these issues is related to the possible presence of water intake structures, nuclear power plants and other facilities downstream from the accident sites, the operation of which may be negatively affected not only by dangerous goods entering their zone, but also by substances formed as a result of chemical reactions. Based on previous studies with the participation of the authors, a site in the area of 894-900 km was selected. The Volga River has a moderate risk and a complex topology of the riverbed surface. Simulation of the propagation of a plume of industrial salt pollution and substances formed as a result of chemical reactions was performed using the Flow Vision software package. The situation of a hull breach as a result of its stranding was taken as the initial one. The availability of information on the distribution fields of harmful substances as a result of the occurrence of a simulated accident makes it possible to prepare for it in advance and carry out a set of preventive measures.

Keywords: emergency site; modeling of pollution spread; water transport; chemical reactions; technical salt

Financial Support: the study was carried out at the expense of the Volga State University of Water Transport

For citation: Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov, Modeling of the processes of spreading technical salt pollution in the event of a ship accident. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 133—141. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.069

Введение

В последние пять лет объем перевозок грузов на водном транспорте характеризуется относительной стабильностью. При этом отдельные речные бассейны показали разные тенденции и изменение структуры перевозимых грузов. Так в центральной части России в Камском бассейне на 9,3% выросли объемы перевозок за счет перевозок нефти, строительных грузов, металлов и металлопродукции, соли), в Волжском бассейне объемы перевозок выросли на 4,6% в основном за счет перевозок зерна, металлов и строительных грузов), в Волго-Донском бассейне — на 0,5% за счет роста перевозок зерна, стройматериалов, нефти и серы) [1]. В целом, среди перевозимых грузов внутренним водным транспортом достаточно весомую долю занимают перевозки опасных грузов [2].

Загрязнение, вызванное попаданием таких грузов в воду в результате аварий судов, может приводить к тяжелым экологическим последствиям [3,4]. Эти последствия могут усугубляться наличием поблизости водозабора, АЭС, особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [3]. Попадание таких грузов в водную среду несет с собой не столько загрязнение как таковое, сколько воздействие от химических реакций, активирующихся при попадании грузов в реку. Например, при авариях с судами и попадании технической соли или других химически активных грузов в реку, возможны химические реакции и образование новых веществ, увеличивающих возможные последствия аварии. Например, усиливая коррозию отдельных элементов водозаборных сооружений. Это приводит к необходимости при прогнозировании последствий таких аварий моделировать процессы распространения загрязняющих веществ [5–7].

Опасные грузы при попадании в воду начинают распространяться по течению реки и тем самым могут накладывать ограничение на водопользование в прибрежной зоне. Эти ореолы не простираются на все русло, да и характер водопользования на находящихся ниже по течению объектах может различаться (например, технические нужды, полив, водозабор для промышленных предприятий, питьевые нужды и т.д.). Естественно, тип водопользования накладывает разные требования к предельной концентрации и поэтому появляется вариативность в решении задачи о техногенном воздействии на окружающую среду.

Помимо непосредственного анализа распространения вредных химических реагентов по потоку реки, немаловажным фактором становится необходимость учета химических реакций, идущих в потоке. Причем интенсивность этих реакций в каждой точке потока различна и, соответственно, наличие критического значения ПДК веществ тоже многообразно. Таким образом, прямым путем минимизации последствий от аварий судов, сопровождающихся выбросом химически активного груза, является наличие предварительного прогноза о характере распределения шлейфов концентрации вредных веществ по руслу реки. Наличие данных о

пространственно-временном распределении вредных веществ в результате аварии позволит определить продолжительность устранения аварии или ее последствия. Наиболее простым и адекватным способом получения информации о динамике распространения вредных веществ, является математическое моделирование подобных аварийных ситуаций.

Вопросам распространения грузов, попадающих в воду в результате аварий, посвящены отдельные исследования [2-11], но в основном, они посвящены моделированию разливов нефти [6, 8, 9 – 11]. Моделированию распространения загрязнения сухих опасных грузов уделено значительно меньшее внимание. Данная работа опирается на результаты, полученные с участием авторов в более раннем исследовании, определяющем наиболее аварийные участки в пределах Волжского бассейна [2].

Целью данного исследования является математическое моделирование процессов распространения технической соли с учетом образующихся химических реакций с фоновыми загрязнениями в границах одного из участков Волжского бассейна.

Для реализации этой цели были прославлены следующие задачи:

- провести анализ литературных источников по теме исследования;
- выбрать участок Волжского бассейна для анализа;
- рассмотреть возможные химические реакции от взаимодействия технической соли с водной средой и корпусом судна;
- выполнить моделирование процесса распространения шлейфа загрязнений и образующихся от реакций веществ при по речному руслу;
- выполнить анализ полученных результатов.

Обзор литературных источников

Перевозимые по речным и морским бассейнам грузы можно условно разделить на несколько групп: наливные грузы (нефть и нефтепродукты, сжиженный газ), контейнеры и навалочные грузы (зерно, как уголь, руда, сера и др.). Анализ работ [6,12] показал, что на долю навалочных грузов приходится более 50% всех перевозимых грузов [12]. Большой объем их попадает как в мировой океан, так и в речную систему. Выделяются два различных пути попадания этих грузов в водную среду, которые включают аварийные выбросы (аварии судов) и эксплуатационные выбросы (сброс или выгрузка остатков груза после тщательной очистки или мойки грузовых трюмов после разгрузки) [13]. Если аварии с нефтью и нефтепродуктами широко освещаются в средствах массовой информации (СМИ), то потери сухогрузов происходят чаще, но они обычно происходят без уведомления прессы и общественности [14]. На основании различных отчетов [15, 16], данных Международной Ассоциации владельцев сухогрузных судов [14], а также данных, приведенных Germanischer Lloyd в работе [6], было выявлено, что по 239 из 503 судов для перевозки

навалочных грузов, затонувших в период с 1978 по 2012 год, не было никакой информации о принадлежности груза. По речным бассейнам состояние с наличием информации аналогично [2]. По результатам анализа, представленного в работе [12], общее ежегодное воздействие навалочных грузов на морскую среду в размере более 2,15 миллионов тонн. Кроме того, в этой же работе доказано, что выбросы нетоксичных грузов в чувствительную окружающую среду могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Например, в работе [12] говорится, что даже не попадающее под категорию опасных грузов зерно, при сбросе в прибрежную зону может образовывать слой на дне, выделяя токсичные газы и уничтожая флору и фауну. Были отмечены такие явления, как гибель растительности, связанные с аварией судов с углем. Огромное количество поступивших данных по ряду таких грузов в воду указывает на наличие проблемы, требующей решения. Вместе с тем, имеющейся в настоящее время исследований по данной тематике недостаточно.

В работах [6, 17, 18] говорится, что загрязнение питьевой воды в последние годы является серьезной экологической проблемой. Большинство источников питьевой воды в Китае - это реки и озера, которые подвержены внешним источникам риска, в том числе в результате транспортных происшествий с судами [19]. В работе [6] делается вывод, что разработка эффективной программы прогнозирования состояния источников питьевой воды имеет важное значение и необходима для разработки схем действий в чрезвычайных ситуациях, а также для обеспечения здоровья городских жителей при авариях, связанных с загрязнением воды токсичными веществами.

Что касается моделей гидродинамики и качества воды, исследователи разработали и применили модель SeP, модель QUAL, модель БАССЕЙНОВ, модель SMS и модель WASP [20, 21]. Xin X.K. и др. [22] рассчитали три типа выбросов загрязняющих веществ в TGR с помощью программного обеспечения MIKE 21 AD и обсудили влияние аварийных режимов на различные типы выбросов. В исследовании [6] проводилась разработка программы прогнозирования аварий, связанных с опасным химическим загрязнением источников питьевой воды при различных гидрологических условиях.

С помощью предлагаемой в работе программы HDWS был выполнен прогноз загрязнения опасными химическими веществами с учетом скорости потока, изменения концентрации загрязняющих веществ и миграцию групп загрязняющих веществ в районе исследований после аварии на водохранилище Сянцзяба.

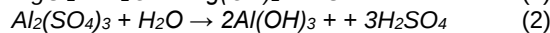
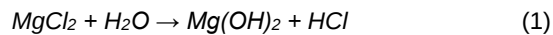
Вопросам загрязнения опасными сухими грузами в работе отечественных исследований уделено недостаточное внимание. Особенно в контексте возможных химических реакций при попадании груза в воду.

Материалы и методы

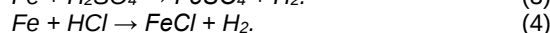
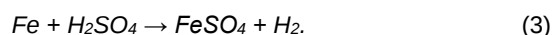
Для выполнения тестового расчета был выбран участок районе Нижнего Новгорода от Сормовского района г. Н. Новгорода до Борского моста с (894 -900 км). Он включает в себя Верхний, Средний и Нижний Ревятские перекаты и завершается в низовьях течения в створе Борского моста. Выбор участка связан, с одной стороны, с его к участку с умеренным риском аварийности [2]. С другой стороны, с особенностями топологии поверхности его русла, способствующему крайне высокой активности турбулентных процессов, сопровождающих движение речного потока. В результате следует ожидать максимально интенсивный характер процесса перемешивания выбросов в речное русло и максимально негативное воздействие техногенной аварии на окружающую водную среду.

Исходной точкой создания компьютерной математической модели стало решение полной системы гидродинамических уравнений Навье Стокса, описанное в работе [23]. Далее она была дополнена математической моделью турбулентности и системой уравнений химических реакций. Для моделирования кинетики химических реакций был использован стехиометрический подход перехода энтальпии в веществах, вступающих в химическую реакцию.

В рассматриваемом примере разбирается ситуация пробоины корпуса судна в результате, например, посадки на мель. В результате аварии в речное русло начали попадать перевозимые соли: хлорид магния ($MgCl_2$) и Сульфат Аллюминия $Al_2(SO_4)_3$. При их попадании в воду, активизировались химические реакции:



Образующиеся в результате реакций кислоты начинают вступать в химические реакции с металлом корпуса корабля. В результате мы имеем вторичную реакцию вида:



То есть, при взаимодействии кислоты с металлом, начинает формироваться сульфат железа и водород.

Завершающим элементом математической модели является уравнение, описывающее характер растворения и перемещения внешних примесей по водному потоку. Этот процесс является совокупностью трех явлений: диффузионное растворение примеси в воде, конвективный перенос примесей по потоку и седиментационное осадений примесей под воздействием собственной массы. Этот процесс в современной практике хорошо описывает уравнение молекулярно-турбулентной диффузии:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - w \frac{dC}{dz} = \frac{\partial C}{\partial t} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

где: C – концентрация химического элемента;
 t – время;
 w – гидравлическая крупность вещества (скорость седиментации);
 V_x, V_y, V_z – компоненты абсолютной скорости движения жидкости;
 D_x, D_y, D_z – компоненты горизонтальной и вертикальной диффузии хим элемента;
 Значения коэффициентов диффузии принимались по известным справочным данным, аналогично определялась скорость седиментации.
 Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса Flow Vision..

Результаты и обсуждение

Попавшие в воду соли и сформировавшиеся новые химические соединения начинают смещаться вниз по течению в виде шлейфов. Процесс движения шлейфа концентраций веществ приобретает квазистационарный характер. То есть, химическая субстанция постепенно распространяется по течению реки и через определенное время поле распространения концентраций становится стационарным.

Характер загрязняющего воздействия водной среды после стабилизации процесса, иллюстрирует рис.1

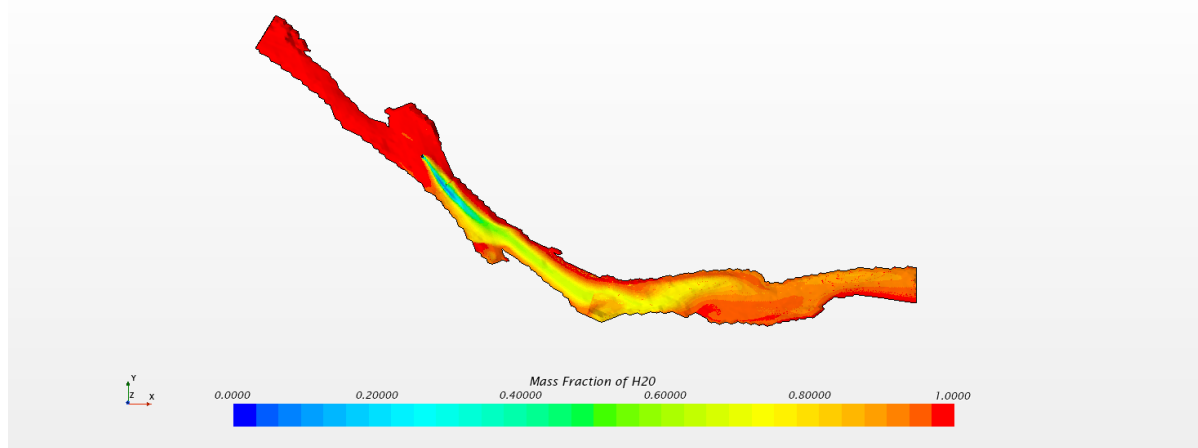


Рис.1. Концентрации воды с фоновым содержанием примесей в речном русле на исследуемом участке при аварийном загрязнении

Как следовало ожидать и видно из рис.1 весь шлейф химических примесей стал стабильно спускаться вниз по течению. Условно единичную (100%) концентрацию воды (т.е. с фоновым содержанием примесей), после прохождения точки аварии, постепенно сменяют области присутствия концентрации примесей при аварийном загрязнении.

Концентрация примесей в воде, около точки посадки на мель, колеблется от 20 до 40 процентов. Затем, на расстоянии 1.5 – 2.0 км вниз по течению, процент примесей увеличивается до 90 %, так как процент содержания воды в каждой точке составляет 8 - 12 %. Дальнейшее движение речного потока и перемешивание воды с вновь попавшими в реку реагентами начинает равномерно распределять примеси по объему речного потока. В результате процент примесей в речном потоке снижается до 25 - 30%, и то только в стремнинной части русла. При этом левобережная область полностью незатронутого техногенной аварией части потока начинает расширяться.

Таким образом, шлейф примесей распространяться вниз по течению и ореол контура его распространения напоминает факел. При этом он все больше и больше захватывая живое сечение русла. Полное растворение хим. примесей наблюдается к концу нижнего переката, где концентрация примесей становится равномерной по

всему сечению. Примечательным моментов результатов моделирования является тот факт, что из-за особенностей структуры речного потока, большая часть левого берега практически не затрагивается внешними примесями. То есть, качество воды в левобережной части русла практически остается на том же уровне. Таким образом, для левобережных водопользователей практически никаких угроз не возникает.

Естественно, для водопользователей на правом берегу остаются только несколько зон для взятия качественной воды на свои нужды. Это область в начале шлейфа сброса солей, и в двух затонских емкостях. Наличие затонских емкостей, создают «мертвые зоны» водообмен которых с основным руслом нулевой. С одной стороны это формирует застойную зону, где вода стоит длительное время без движения. С другой стороны, отсутствие водообмена с основным руслом, сводит к нулю попадание вредных веществ в эту область.

Таким образом наиболее опасной зоной для забора воды для водопользования будет область потока в 1,5-2,0 км вниз по течению реки, где объем примесей в реке составляет до 90 %.

Наибольшую опасность для жизни людей представляют примеси кислот, попадающие в воду речного потока (см. рис. 2 и 3).

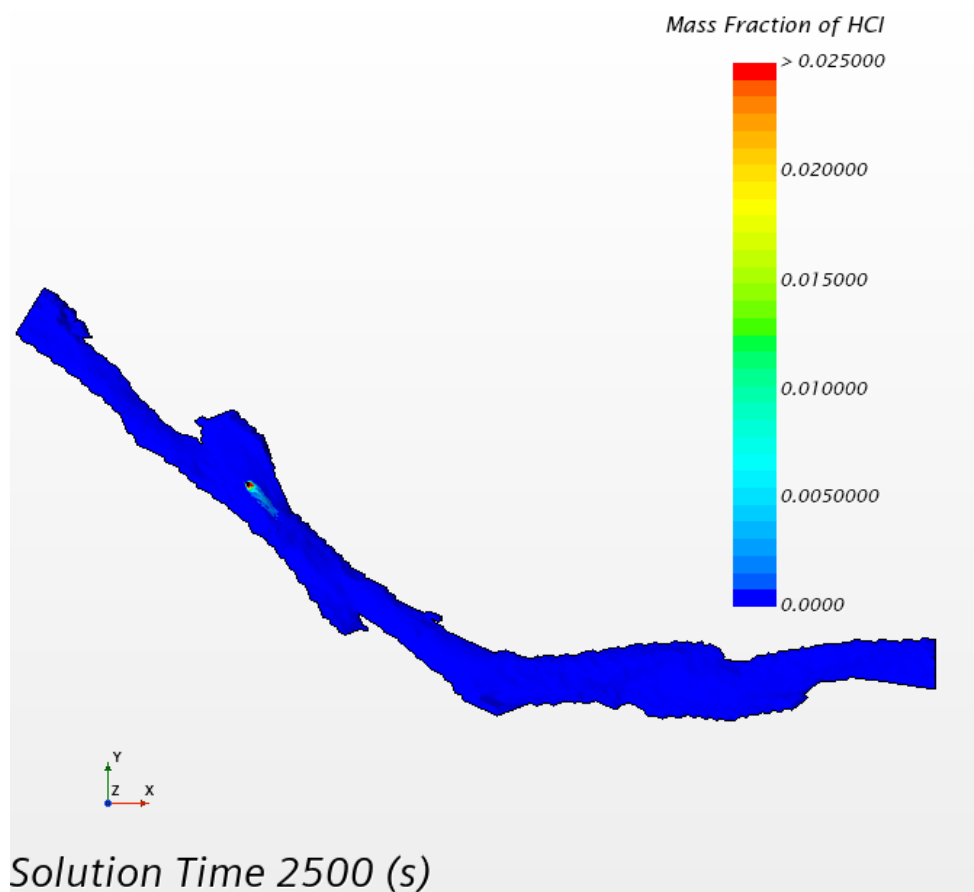


Рис.2. Схема распространения и концентрации шлейфа соляной кислоты HCl.

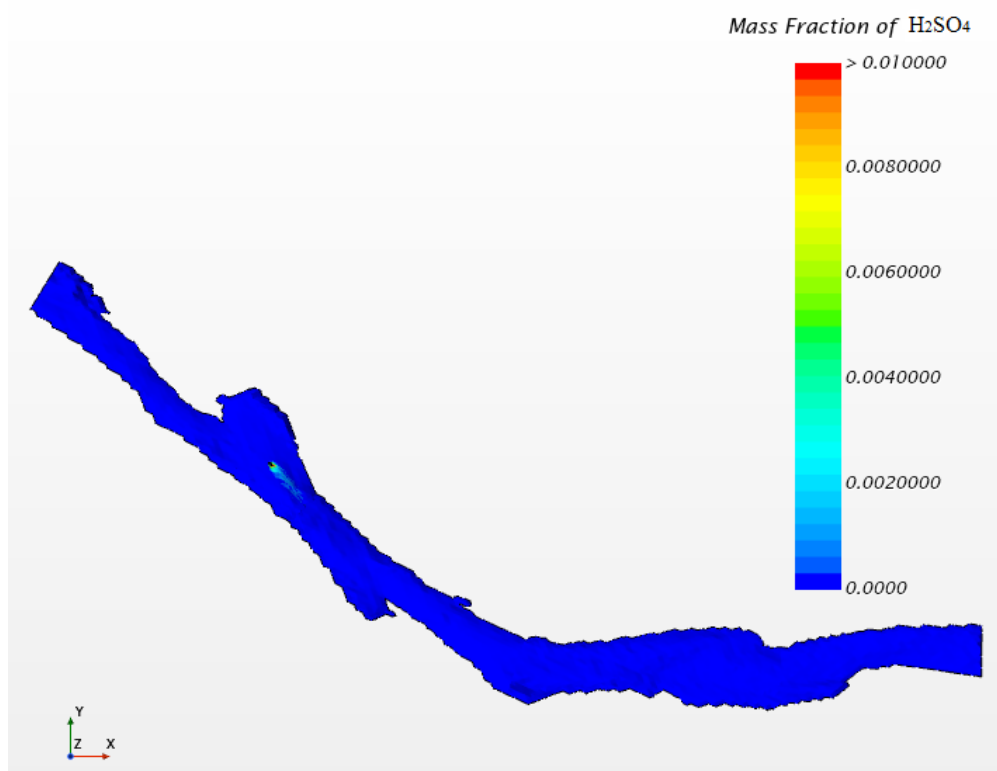


Рис.3. Схема распространения и концентрации шлейфа серной кислоты H₂SO₄

Как видно из рис. 2 и 3 шлейф мутности образующихся кислот достаточно локализован в окрестности аварии судна. Максимальные концентрации соляной кислоты HCl могут достигать 2.5%, а серной кислоты H_2SO_4 до 1%. Таким образом, область влияние на флору и фауну речного потока в окрестностях Ревятских перекатов не столь значительна и особой опасности не представляет.

Наибольшее распространение в исследуемом случае имеют ионы металла и хлорид железа (см.

рис. 4 и 5). Их влияние на окружающую водную среду крайне специфично и определяется особенностями фито планктона и водопотреблением прилегающих потребителей. Наличие выше представленных результатов позволяет однозначно обезопасить их от последствий техногенной аварии и минимизировать риски в процессе жизнедеятельности.

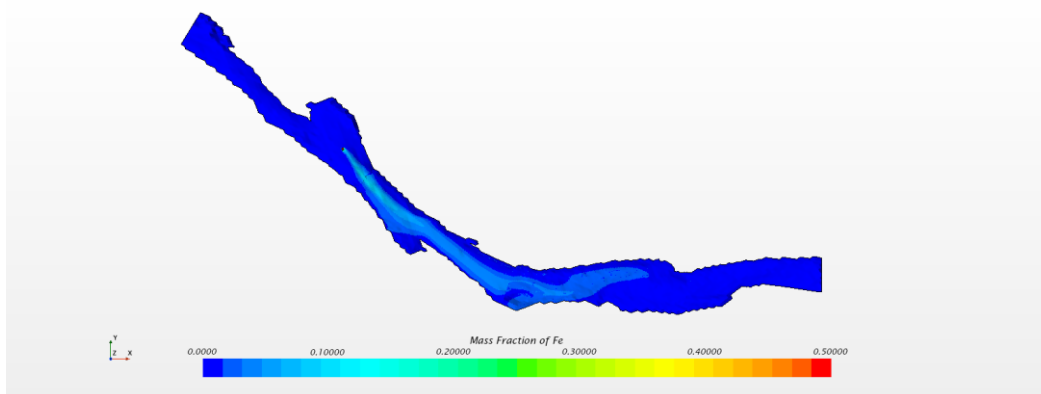


Рис.4. Схема распространения и концентрации шлейфа ионов металла Fe

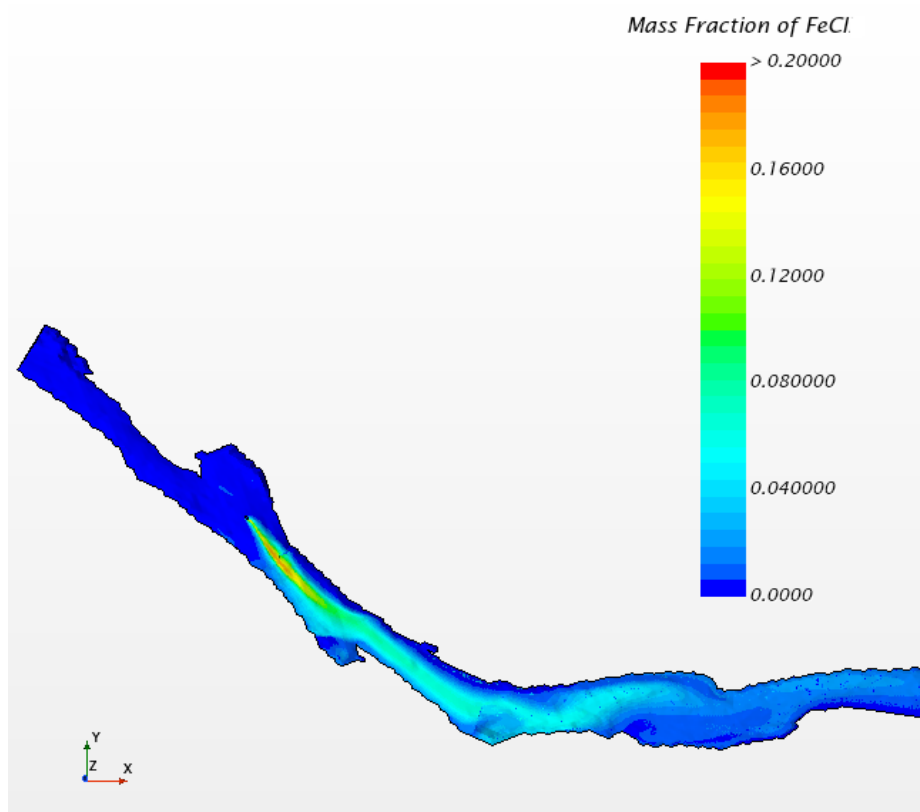


Рис.5. Схема распространения и концентрации шлейфа хлорида металла FeCl

Наличие дискретной информации о полях распределения вредоносных концентраций солей и кислот в результате наступления моделируемой техногенной аварии дает возможность заблаговременно подготовиться к ней и провести комплекс превентивных мероприятий. В частности, заранее предупредить всех водопользователей о

зонах, где величина примесей в речном потоке превышает критические значения, запретить ее использование в течении всего периода прохождения выбросов. Помимо этого, в случае необходимости точно указать точки, где забор воды не повредит здоровью и окружающей среде, так как моделирование и анализ результатов четко

показывают места в речном потоке, не затрагиваемые шлейфами вредных примесей.

Заключение

Таким образом, в результате данного исследования были получены следующие результаты:

1. Обзор иностранной и отечественной литературы показал, что если аварии с нефтепродуктами широко освещаются в статьях и СМИ, то данных о потерях сухогрузов несмотря на частоту наступления событий собрать достаточно сложно. Вместе с тем, сухие грузы при попадании в водную среду могут причинять существенный экологический вред. Этот вред может усугубляться за счет взаимодействия сухих грузов с водой и фоновыми загрязнениями. Поэтому зачастую поблизости водозаборных сооружений, АЭС, ООПТ встает задача моделирования распространения загрязнений с учетом возможных химических реакций.

2. На основе ранее выполненной работы с участием авторов, был выбран участок с умеренным риском в районе 894-900 км в Волжском бассейне. Авторы остановились на этом участке в связи с его сложной топологией поверхности русла, способствующей активизации турбулентных процессов.

3. Была разработана компьютерная математическая модель распространения загрязнения в результате аварии сухогрузного судна, перевозящего техническую соль. При описании модели учитывались и химические реакции, а также распространение веществ, полученных в их результате.

4. Наличие информации о распределении вредоносных концентраций солей и кислот от возможной моделируемой аварии дает возможность заблаговременно подготовиться и провести комплекс превентивных мероприятий.

В дальнейшем авторы планируют рассмотреть особенности моделирования распространения загрязнения в водохранилищах.

Литература

1. Новости Портныйс от 22.12.2023// <https://portnews.ru/news/357853/> (дата обращения 25.10.2024)
2. Батанина Е.А., Бородин А.Н., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Определение участков концентрации транспортных происшествий с участием судов в республике Татарстан, Морские интеллектуальные технологии. № 4 part 1, С. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
3. Домнина, О. Л. Оценка риска экологических последствий от транспортных происшествий с сухогрузными судами на примере Волжского бассейна / О. Л. Домнина // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Т. 1, № 1(55). – С. 187-193. – DOI 10.37220/MIT.2022.55.1.025
4. 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
5. Aifeng Zhai, Baodeng Hou, Xiaowen Ding, Guohe Huang, Hazardous chemical accident prediction for drinking water sources in Three Gorges Reservoir, Journal of Cleaner Production, Volume 296, 10 May 2021, 126529, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126529>
6. 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, с. 286-308 (2017)
7. SajidZaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, Marine pollution bulletin, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
8. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; 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, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
9. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, Ocean & Coastal Management, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
10. Пластинин А.Е. Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 2. С. 129-135.
11. Шматкова Е.Ю., Пластинин А.Е., Балденков А.П., Бородин А.Н. Оценка воздействия разливов нефти на экологически чувствительные районы в Печорском бассейне. В сборнике: Великие реки - 2020. Труды 22-го международного научно-промышленного форума. 2020. С. 18.
12. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger , Stéphane Le Flochc, Dierk-Steffen Wahrendorfd, Thomas Höfer Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment? Marine Pollution Bulletin, Volume 110, Issue 1, 15 September 2016, P. 511-519, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.066>
13. DF Reid, GA Meadows, 1999, Proceedings of the workshop, the environmental implications of cargo sweeping in the Great Lakes, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0115](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0115)
14. Grundy, P., 2003. Bulk carriers. Mar. Struct. 16, 545–546, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0070](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0070)
15. Roberts, S.E.,Marlow, P.B., 2002. Casualties in dry bulk shipping (1963–1996). Mar. Policy 26, 437–450, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0120](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0120)
16. Stopford, M., 1998. Bulk carriers — safety by objectives? BIMCO Bull. 93, 24–27, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0135](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0135)
17. Chen, Z.B., Zhang, H., Liao, M.X., 2019. Integration Multi-Model to evaluate the impact of surface water quality on city sustainability: a case from Maanshan city in China. Processes 7 (25), 1e16. <https://doi.org/10.3390/pr7010025>.

18. Ighalo, J.O., Adeniyi, A.G., Adeniran, J.A., Ogunniyi, S., 2020. A systematic literature analysis of the nature and regional distribution of water pollution sources in Nigeria. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124566>.
19. Mou, J.M., Chen, P.F., He, Y.X., Yip, T.L., Li, W.H., Tang, J., Zhang, H.Z., 2019. Vessel traffic safety in busy waterways: a case study of accidents in western Shenzhen port. *Accid. Anal. Prev.* 123, 461e468. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.037>.
20. Rinaldi, S., Soncini-Sessa, R., 1978. Sensitivity analysis of generalized Streeter-Phelps models. *Adv. Water Resour.* 1 (3), 141e146. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(78\)90024-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(78)90024-6).
21. Mbuh, M.J., Richard, M., Comfort, W., 2018. Water quality modeling and sensitivity analysis using water quality analysis simulation program (WASP) in the Shenandoah river watershed. *Phys. Geogr.* 40 (2), 127e148. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1507339>.
22. Xin, X.K., Yin, W., Wang, M., 2012. Reservoir operation schemes for water pollution accidents in Yangtze River. *Water Sci. Eng.* 5 (1), 59e66. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2012.01.006>.
23. Домнина, О. Л. Влияние гидроморфологических особенностей речного русла на характер распределения шлейфа загрязнения нефтью при авариях судов / О. Л. Домнина, И. В. Липатов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 2-1(56). – С. 258-268. – DOI 10.37220/MIT.2022.56.2.034

References

1. Novosti Portn'yus ot 22.12.2023, <https://portnews.ru/news/357853/> (data obrashcheniya 25.10.2024)
2. Ekaterina A. Batanina, Alexey N. Borodin, Olga L. Domnina, Andrey E. Platinin, Determination of areas of concentration of transport accidents with the participation of ships in the Republic of Tatarstan, *Marine intellectual technologies*. № 4 part 1, C. 161-168 (2020) doi: 10.37220/MIT.2020.50.4.022
3. Olga L. Domnina, Risk Assessment of Environmental Consequences from Transport Accidents with Dry Cargo Vessels on the Example of the Volga Basin. *Marine intellectual technologies*. 2022. № 1 (55) V.1.pp. 187-193.
4. Olga L. Domnina, Andrey E. Platinin, 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). C. 79-84.
5. Aifeng Zhai, Baodeng Hou, Xiaowen Ding, Guohe Huang, Hazardous chemical accident prediction for drinking water sources in Three Gorges Reservoir, *Journal of Cleaner Production*, Volume 296, 10 May 2021, 126529, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126529>
6. 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, c. 286-308 (2017)
7. SajidZaman; Khan Faisal; Veitch Brian Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters, *Marine pollution bulletin*, Volume 153. p.111001; (2020) doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111001
8. Liu Xin; Guo Mingxian; Wang Yebao; Yu Xiang; GuoJie; 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*, Volume 110 Issue 1, p.194-202 (2016) doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
9. Yao Yu, Liming Chen, Wanying Zhu Evaluation model and management strategy for reducing pollution caused by ship collision in coastal waters, *Ocean & Coastal Management*, 16 November 2020, Volume 203 (Cover date: 1 April 2021), Article 105446, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105446
10. Platinin A.E. Assessment of pollution during oil spill on the water surface. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of the Sea and River Fleet*. 2013. №. 2. pp. 129-135.
11. Shmatkova E.Yu., Platinin A.E., Baldenkov A.P., Borodin A.N. Assessment of the impact of oil spills on environmentally sensitive areas in the Pechora basin. In the collection: *Great Rivers - 2020. Proceedings of the 22nd International Scientific and Industrial Forum*. 2020. p. 18.
12. Matthias Grote, Nicole Mazurek, Carolin Gräbsch, Jana Zeilinger, Stéphane Le Flochc, Dierk-Steffen Wahrendorfd, Thomas Höfer Dry bulk cargo shipping — An overlooked threat to the marine environment? *Marine Pollution Bulletin*, Volume 110, Issue 1, 15 September 2016, P. 511-519, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.066>
13. DF Reid, GA Meadows, 1999. Proceedings of the workshop, the environmental implications of cargo sweeping in the Great Lakes, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0115](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0115)
14. Grundy, P., 2003. Bulk carriers. *Mar. Struct.* 16, 545–546, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0070](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0070)
15. Roberts, S.E., Marlow, P.B., 2002. Casualties in dry bulk shipping (1963–1996). *Mar. Policy* 26, 437–450, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0120](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0120)
16. Stopford, M., 1998. Bulk carriers — safety by objectives? *BIMCO Bull.* 93, 24–27, [http://refhub.elsevier.com/S0025-326X\(16\)30386-1/rf0135](http://refhub.elsevier.com/S0025-326X(16)30386-1/rf0135)
17. Chen, Z.B., Zhang, H., Liao, M.X., 2019. Integration Multi-Model to evaluate the impact of surface water quality on city sustainability: a case from Maanshan city in China. *Processes* 7 (25), 1e16. <https://doi.org/10.3390/pr7010025>.
18. Ighalo, J.O., Adeniyi, A.G., Adeniran, J.A., Ogunniyi, S., 2020. A systematic literature analysis of the nature and regional distribution of water pollution sources in Nigeria. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124566>.
19. Mou, J.M., Chen, P.F., He, Y.X., Yip, T.L., Li, W.H., Tang, J., Zhang, H.Z., 2019. Vessel traffic safety in busy waterways: a case study of accidents in western Shenzhen port. *Accid. Anal. Prev.* 123, 461e468. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.037>.
20. Rinaldi, S., Soncini-Sessa, R., 1978. Sensitivity analysis of generalized Streeter-Phelps models. *Adv. Water Resour.* 1 (3), 141e146. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(78\)90024-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(78)90024-6).

21. Mbuhi, M.J., Richard, M., Comfort, W., 2018. Water quality modeling and sensitivity analysis using water quality analysis simulation program (WASP) in the Shenandoah river watershed. Phys. Geogr. 40 (2), 127e148. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1507339>.
22. Xin, X.K., Yin, W., Wang, M., 2012. Reservoir operation schemes for water pollution accidents in Yangtze River. Water Sci. Eng. 5 (1), 59e66. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2012.01.006>.
23. Olga L. Domnina, Igor V. Lipatov The Influence of Hydromorphological Features of the River Channel on the Distribution of the Oil Pollution Plume during Ship Accidents, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. p 258-268. DOI 10.37220/MIT.2022.56.2.034.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Домнина Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Olga L. Domnina, Ph.D.(Eng), assistant professor, Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, Nesterov str., 5, N. Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: o-domnina@yandex.ru

Липатов Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: i_lipatov@mail.ru

Igor V. Lipatov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Waterways and Hydraulic Structures, Volga State University of Water Transport, 603950, N. Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: i_lipatov@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 07.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 24.11.2024.

Научная статья

УДК 627.132

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.070>

Исследование влияния строительства мостового перехода через р. Ока (г. Нижний Новгород) на вышерасположенные водоводы с применением математического моделирования руслового потока

Решетников М.А.¹ serfskiwind@gmail.com, Ситнов А.Н.¹ stnv1952@rambler.ru,Воронина Ю.Е.¹ yulez@yandex.ru, Шестова М.В.¹ shestowam@yandex.ru¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Для проектируемого мостового перехода через р. Ока в г. Нижний Новгород произведена оценка влияния его строительства на надежность эксплуатации вышерасположенных по течению водоводов в русле. Данные водоводы подвержены размыву и для оценки влияния возводимых опор моста на состояние водоводов произведено трехмерное математическое моделирование речного потока в исследуемом районе реки. Моделирование основывается на системе уравнений Навье-Стокса. Для описания турбулентных явлений используется *k-ε* модель турбулентности. Трехмерная геометрия исследуемого участка включает русло реки, мостовые опоры, водоводы. Выполненное математическое моделирование участка р. Ока в районе водоводов в двух состояниях – в естественном (до строительства моста) и эксплуатационном (после ввода моста в эксплуатацию) при низких межених уровнях позволило сделать вывод о практически отсутствующем влиянии опор моста на дальнейший размыв дна в районе водоводов. Также не оказывает влияния на размыв дна под трубами водоводов дноуглубление, необходимое для поддержания судоходства на дополнительном судовом ходу в рукаве. Результаты работы предназначены для использования при проектировании и строительстве объекта.

Ключевые слова: речной поток, гидравлика, математическое моделирование, мостовые опоры, дноуглубление.

Для цитирования: Решетников М.А., Ситнов А.Н., Воронина Ю.Е., Шестова М.В. Исследование влияния строительства мостового перехода через р. Ока (г. Нижний Новгород) на вышерасположенные водоводы с применением математического моделирования руслового потока. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 142—146. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.070

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.070>

Investigation of the impact of the construction of a bridge crossing over the river Oka (Nizhny Novgorod) on the upstream waterways using mathematical modeling of the riverbed flow

Maxim A. Reshetnikov¹ serfskiwind@gmail.com, Aleksandr N. Sitnov¹ stnv1952@rambler.ru,Yulia E. Voronina¹ yulez@yandex.ru, Marina V. Shestova¹ shestowam@yandex.ru¹Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. For the projected bridge crossing over the river. An assessment of the impact of its construction on the reliability of operation of upstream aqueducts in the riverbed was carried out in Nizhny Novgorod. These conduits are subject to erosion and to assess the impact of the bridge supports being erected on the condition of the conduits, three-dimensional mathematical modeling of the river flow in the studied river area was performed. The simulation is based on a system of Navier-Stokes equations. The *k-ε* turbulence model is used to describe turbulent phenomena. The three-dimensional geometry of the area under study includes the riverbed, bridge supports, and culverts. The performed mathematical modeling of the section of the river The Oka in the area of the aqueducts in two states – in natural (before the construction of the bridge) and operational (after the bridge was put into operation) at low inter-soil levels allowed us to conclude that there was practically no effect of the bridge supports on further erosion of the bottom in the area of the aqueducts. Also, dredging, which is necessary to maintain navigation on an additional ship's course in the sleeve, does not affect the erosion of the bottom under the pipes of the aqueducts. The results of the work are intended for use in the design and construction of the facility.

Keywords: river flow, hydraulics, mathematical modeling, bridge supports, dredging.

For citation: Maxim A. Reshetnikov, Aleksandr N. Sitnov, Yulia E. Voronina, Marina V. Shestova, Investigation of the impact of the construction of a bridge crossing over the river Oka (Nizhny Novgorod) on the upstream waterways using mathematical modeling of the riverbed flow. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 142—146. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.070

Введение

Нижегородская агломерация является крупнейшей в Поволжье. Она – драйвер

экономического роста всего региона: здесь сконцентрировано более 60% населения области и 75% валового регионального продукта (ВРП). Базовая программа развития агломерации

включается в себя три основных направления: развитие жилищного строительства; реформа общественного транспорта; редевелопмент исторического центра.

Юг столицы Приволжья — это посёлок Новинки и деревня Ольгино, которые совсем недавно вошли в состав областного центра. Эти площади предлагается развивать с помощью инновационного механизма комплексного развития территории. Недавно, для обеспечения связности территорий, здесь было завершено возведение крупной развязки: масштабное жилищное строительство будет полностью синхронизировано с дорожным каркасом. Транспортная доступность нового микрорайона будет обеспечена путём строительства дублёра проспекта Гагарина, в состав которого войдёт пятый мост через Оку.

Дублер является неотъемлемой частью комплексного развития нижегородской агломерации. Проект реализуется по поручению президента России и при поддержке Министерства транспорта РФ. Дублер проспекта Гагарина (рис. 1) станет частью нового транспортного каркаса нижегородской агломерации.



Рис. 1. Схема расположения моста и водоводов

Проектом строительства моста предусматривается также выполнение дноуглубительных судоходных прорезей. Однако возведение мостового перехода, а также разработка дноуглубительных прорезей может оказать влияние на структуру речного потока в зоне перехода. В эту зону попадают водоводы Заводских сетей, располагающиеся в несудоходном рукаве р. Ока в районе острова Новинского водного узла примерно на 1 км выше створа моста. В настоящее время в зоне водоводов существуют локальные зоны размыва дна реки, что ухудшает их надежную эксплуатацию. Для оценки влияния строительства мостового перехода на русловые процессы в районе водоводов следует исследовать изменение структуры речного потока.

Большинство рекомендации по прогнозной оценке влияния мостовых переходов на динамику русловых процессов основаны на приближённых гидравлико-морфологических расчётах применительно к весьма схематизированному представлению морфологии русла, а также взаимодействию потока и опор моста [1, 2, 3, 4]. В настоящее время стало актуальным использование численных методов моделирования гидравлических процессов. Применение численного моделирования позволяет выявить все особенности руслового потока с учетом его пространственного распределения [5,6,7].

Методика проведения исследования

Для решения поставленной задачи по оценке влияния строительства мостового перехода через р. Ока на водоводы Заводских сетей использовался программный комплекс, предназначенный для численного решения уравнений динамики движения жидкости. Целью моделирования движения жидкости в расчетной области являлось получение распределения скоростей потока. Для расчета данных параметров задавались физические законы их изменения, совокупность свойств которых использована для постановки математической модели конкретной задачи.

Применение численных методов исследования позволяет учесть пространственное (трехмерное) распределение руслового потока и влияние на него опор проектируемого мостового перехода. Это, в свою очередь, дает возможность определить оптимальное расположение мостовых опор.

Структура речного потока описывается системой уравнений Навье-Стокса (1), дополненной уравнением неразрывности (2).

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} - v \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{dV_y}{dt} - v \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) = F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{dV_z}{dt} - v \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) = F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

где V_x , V_y , V_z — проекционные скорости движения частицы; P — давление; F_x , F_y , F_z — проекции действующих сил на частицу; v — вязкость учитывающая вязкость самой среды и турбулентную составляющую.

Турбулентная составляющая по стандартной к-е модели определяется на основе расчета кинематической энергии турбулентности и её диссипации [8, 9, 10].

Создание твердотельной модели исследуемого участка основывается на имеющихся гидрографических планах участка с помощью CAD-программного обеспечения. Полученная CAD модель участка описывает весь рельеф дна и представляет из себя триангуляционную сеть. Следующим этапом подготовки данных для моделирования является создание расчетной трехмерной объемной сети с промежуточным переразбиением поверхностной сети. При ее создании особое внимание уделено зоне водоводов, в которой сетка дополнительно измельчалась для наиболее точного решения потока. Общее количество расчетных ячеек составляет 1,3млн. Участок трехмерной сети представлен на рис. 2.

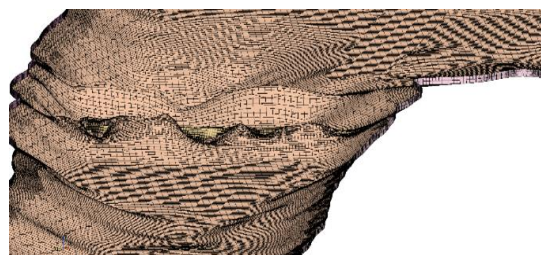


Рис. 2. Рельеф дна в районе водоводов после построения трехмерной сетки

Для учета влияния геометрии водоводов, расположенных выше дна реки на структуру потока, их геометрия булевой операцией вырезана из общей расчетной области потока (рис. 3).



Рис. 3. Учет геометрии водоводов, расположенных выше дна реки (провисающие участки)

Для постановки математической модели речного потока необходимо определить поведение системы на её границах (областях):

а) входная область (inlet). Описывается значениями скоростей потока, которые определяются исходя из расчета расхода (5):

$$v_x = f(x, y, z); v_y = f(x, y, z); v_z = f(x, y, z) \quad (5)$$

б) выходная область (outlet). Условие, по которому производная скорости потока приравнивается к нулевому значению (6):

$$\frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

в) стенка (wall). Условие, по которому массовый расход жидкости через данную область запрещен (7):

$$V_x = V_y = V_z = 0 \quad (7)$$

г) поверхность воды (symmetry). Для данной области скоростные компоненты перпендикулярные к области, равны нулю. Движение жидкости предусматривается только вдоль области.

При моделировании рассматриваются два расчетных варианта:

1. естественное состояние участка русла реки;
2. проектное состояние русла реки – после возведения опор моста с учетом выполнения необходимых дноуглубительных работ.

Для обоих расчетных случаев принят расчетный расход воды в 560 м³/с на основании анализа гидрологического режима реки [3].

Результаты математического моделирования

На основе полученных результатов математического моделирования речного потока на исследуемом участке р. Ока в районе водоводов Заводских сетей выполнен анализ и прогноз возможных русловых деформаций в естественном и эксплуатационном состояниях. Применение численного моделирования позволяет исследовать изменение структуры потока по множеству скалярных и векторных величин. Для выявления изменения структуры потока сравниваются скоростные поля в естественном и проектном состояниях. На рис. 4 представлены значения поверхностных скоростей речного потока в двух состояниях.

Особое внимание уделено скоростному полю потока между водоводами и дном на оголенных участках (рис. 5).

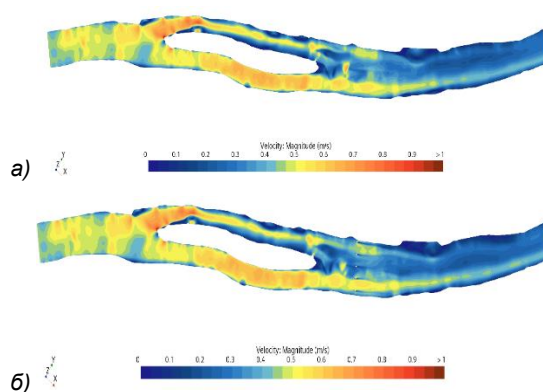


Рис. 4. Скалярное распределение поверхностных скоростей: а) естественное состояние; б) проектное состояние.

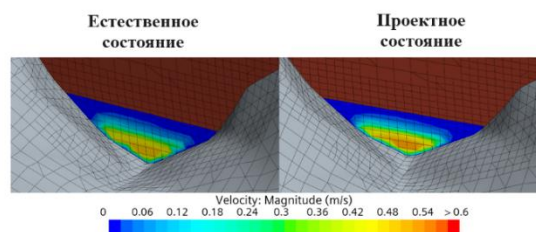


Рис. 5. Значения скоростей потока под оголенным участком нижней нитки водоводов

Для исследования также рассмотрены линии тока, зоны вихреобразования, турбулентные процессы и другие величины, позволяющие оценить влияние мостового перехода и дноуглубительных прорезей на гидравлику потока у водоводов.

Выводы и результаты

После запуска в эксплуатацию мостового перехода с учетом выполнения дноуглубительных работ на основном и дополнительном судовых ходах, векторное скоростное поле речного потока практически не изменяется по отношению к его естественному состоянию.

На основании выполненного анализа скоростного поля потока в продольных профилях у водоводов выявлено, что на параметры и расположение существующих водоворотных зон практически не сказывается возведение опор моста и выполнение дноуглубительных работ. Следует отметить, что устройство дноуглубительных прорезей и возведение опор мостового перехода сказывается на изменении значений поверхностных скоростей в районе водоводов. Поверхностные скорости речного потока на подходах к водоводам снижаются, а затем при их прохождении они достигают максимальных значений. Таким образом, при переливе потока через водоводы область потока с максимальными скоростями распределяется ближе к свободной поверхности воды, а не донной части. Данное гидравлическое распределение потока благоприятно сказывается на устойчивости донной части реки после водоводов минимизируя предпосылки к размыву за ними.

Изменение скалярного поля поверхностных скоростей выявлено на участке от ухвостья острова да створа моста (рис. 4). Устройство дноуглубительной прорези на дополнительном судовом ходу в несудоходном рукаве позволяет потоку равномерно распределиться по всей ширине русла.

Скорости у дна достигают максимальных значений в районе нижнего по течению водовода. Между двумя нитками труб водоводов формируется закручивание потока на малых скоростях течения, образуя отдельную область турбулентности, ограниченную трубами, дном и обратными течениями ниже нижней нитки водовода. Ввиду того, что здесь скорости незначительные, циркуляция потока не влияет на размыв непосредственно у дна. Однако повышение скоростей у нижней ветки водоводов при неблагоприятных условиях может спровоцировать продолжение подмыва в будущем. В данном случае (при низком уровне) размыв дна в районе труб не наблюдается ввиду малых значений донных скоростей, которые ниже размывающих для реки Ока.

Заключение

Выполненное математическое моделирование участка р. Ока в районе водоводов в двух состояниях (в естественном и эксплуатационном) при низких

меженных уровнях позволило сделать вывод о практически отсутствующем влиянии опор моста на дальнейший размыв дна в районе водоводов.

Проектируемая судоходная прорезь на дополнительном судовом ходу в несудоходном рукаве, располагается ниже створа водоводов. Существенного влияния на поток (увеличение его скорости) в области водоводов прорезь не оказывает. Прорезь положительно сказывается на равномерном распределении потока по ширине.

При меженных (низких) уровнях воды поверхностные скорости потока как в естественном, так и в проектном состояниях практически неизменны. Незначительные изменения скоростного поля просматриваются лишь у поверхности воды и связаны с перенаправлением потока в сторону дноуглубления. Средние и донные течения полностью повторяют конфигурацию естественного русла. Значения донных скоростей в обоих расчетных состояниях не превышают средних размывающих скоростей для участка р. Ока в нижнем течении (не превышают 0,55 м/с). Причем, все значения скоростей не превышают размывающих значений по участку, что говорит об отсутствии размывов непосредственно в период низких уровней.

Литература

1. Гладков, Г.Л. Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках: Учебное пособие для вузов / Г.Л.Гладков, М.В.Журавлев, Ю.П.Соколов. - СПб, Изд-во А.Кардакова 2005. - 241 с.
2. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. - М.: Транспорт, 1990. 319 с.
3. Ситнов, А. Н. Оценка влияния строительства мостового перехода (г. Нижний Новгород) на русловые процессы и устойчивость судового хода в нижнем течении р. Ока / А. Н. Ситнов, Ю. Е. Воронина, М. В. Шестова // Научные проблемы водного транспорта. - 2023. - № 77. - С. 273-284. - DOI 10.37890/jwt.vi77.445. - EDN IUENBI.
4. Воронина Ю.Е., Шестова М.В., Решетников М.А. Влияние технологии возведения мостового перехода на р. Ока (15-й км судового хода), производства дноуглубительных работ и уровня режима на русловые процессы и устойчивость судового хода.//Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». - 2023. - URL: http://вф-река-море.pf/2023/5_3.pdf
5. Липатов И.В., Решетников М.А., Бандин Д.А. Особенности создания математической модели и ее реализации для моделирования гидродинамики речного потока в нижнем течении р. Ока.//Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». - 2023. - URL: http://вф-река-море.pf/2023/5_6.pdf
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
7. Зиновьев А.Т. Математическое моделирование руслового потока для прогнозов влияния строительства в поймах на гидрологический режим крупных рек (на примере реки Обь) / А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин, Е.Д. Кошелева // Водное хозяйство России, №2, 2017. - с. 54-72
8. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974. "The numerical computation of turbulent flows", Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, pp. 269-289.
9. Rodi, W. 1979. "Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale", Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows.
10. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. Journal of Energy, 7(4), 345-353. doi:10.2514/3.48086

References

1. Gladkov, G.L. Environmental impact assessment of engineering measures on navigable rivers: A textbook for universities / G.L.Gladkov, M.V.Zhuravlev, YU.P.Sokolov. - SPb, Izd-vo A.Kardakova 2005. 241 s.
2. Grishanin K.V. Fundamentals of the dynamics of riverbed flows. M.: Transport, 1990. 319 s.
3. Sitnov A.N. Assessment of the impact of the construction of a bridge crossing (Nizhny Novgorod) on riverbed processes and the stability of the ship's course in the lower reaches of the Oka River / A.N. Sitnov, Y.E. Voronina, M.V. Shestova // Russian Journal of Water Transport. 2023. № 77. С. 273-284. DOI 10.37890/jwt.vi77.445. EDN IUENBI.

4. Voronina Y.E., Shestova M.V., Reshetnikov M.A. The influence of technology for the construction of a bridge crossing on the Oka river (15th km of the ship's course), dredging and level regime on riverbed processes and stability of the ship's course. // Transport. Development horizons. 2023: Materials of the International Scientific and Practical Forum. «VGUVT». 2023. URL: http://вф-пека-мопе.рф/2023/5_3.pdf
5. Lipatov I.V., Reshetnikov M.A., Bandin D.A. Features of creating a mathematical model and its implementation for modeling the hydrodynamics of a river flow in the lower reaches of the Oka river. // Transport. Development horizons. 2023: Materials of the International Scientific and Practical Forum. «VGUVT». 2023. URL: http://вф-пека-мопе.рф/2023/5_6.pdf
6. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / Per. from English. M.: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
7. Zinoviev A.T. Mathematical modeling of riverbed flow for forecasting the impact of construction in floodplains on the hydrological regime of large rivers (on the example of the Ob River) / A.T. Zinoviev, K.B. Koshelev, K.V. Marusin, E.D. Kosheleva // Water Management of Russia, No. 2, 2017. pp. 54-72
8. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974. „The numerical computation of turbulent flows“, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, pp. 269-289.
9. Rodi, W. 1979. „Influence of buoyancy and rotation on equations for turbulent length scale“, Proc. 2nd Symp. on Turbulent Shear Flows.
10. EL TAHRY, S. H. (1983). k-epsilon equation for compressible reciprocating engine flows. Journal of Energy, 7(4), 345–353. doi:10.2514/3.48086

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Решетников Максим Алексеевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта (, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: serfskiwind@gmail.com

Maksim A. Reshetnikov Ph.D. (Eng), senior lecturer of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: serfskiwind@gmail.com

Ситнов Александр Николаевич профессор, д.т.н., зав. кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений Волжский государственный университет водного транспорта , 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru

Aleksandr N. Sitnov Dr. Sci. (Eng), professor, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: stnv1952@rambler.ru

Воронина Юлия Евгеньевна доцент к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: yulez@yandex.ru

Yulia E. Voronina Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: yulez@yandex.ru

Шестова Марина Вадимовна доцент к.т.н., доцент кафедры водных путей и гидросооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: shestowam@yandex.ru

Marina V. Shestova Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: shestowam@yandex.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 27.11.2024.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL PROCEDURES

Научная статья

УДК 004.825:502.52:504.054:656.6

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.071>

Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода

Головацкая Л.И.¹ lesy_g@mail.ru, Сорокин А.А.^{1,2} alsorokin.kimrt@mail.ru, Цыгута А.Н.³ anna.tsyguta@mail.ru,
Пластинин А.Е.³ plastininae@yandex.ru, Отделкин Н.С.³ otdelkin.ns@vsuwt.ru

¹Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М.Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, ²Астраханский государственный технический университет, ³Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы реализации метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода. В рамках метода формируется нечеткая продукционная система. Система основана на агрегировании основных параметров, характеризующих состояние фильтра, в единую оценку. В число параметров входит: оценка эффективности удаления загрязнителя, а также параметры характеризующие затраты на реализацию фильтра и безопасность его эксплуатации. Эксперимент по оцениванию работоспособности предложенных положений показал, что модели обладают необходимой чувствительностью в части отсутствия эффекта «маскирования» неудовлетворительных значений переменных: эффективность удаления загрязнителя и безопасность фильтра, при этом изменение значения переменной стоимость фильтра позволяет сравнивать различные решения в области реализации фильтра при иных равных условиях. Предложенные положения позволяют составлять упорядоченный список различных решений за счет формирования комплексной оценки. Применение нечетких продукционных систем на основе алгоритма Сугено предпочтительнее чем на основе алгоритма Мамдани. Полученные результаты открывают возможности дальнейшего развития средств проектирования систем очистки балластных вод на судах различного назначения и разных районов плавания.
Ключевые слова: фильтры балластных вод, оценка предпочтения выбора, компоненты фильтра балластных вод, нечеткая продукционная система, алгоритм Сугено.

Для цитирования: Головацкая Л.И., Сорокин А.А., Цыгута А.Н., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 147—158. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.071

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.071>

Implementation of a method for forming a comprehensive assessment of the preference for the selection of ballast water filter components based on the provisions of a fuzzy logical conclusion

Lesya I. Golovackaya¹ lesy_g@mail.ru, Aleksandr A. Sorokin^{1,2} alsorokin.kimrt@mail.ru,
Anna N. Tsyguta³ anna.tsyguta@mail.ru, Andrey E. Plastinin³ plastininae@yandex.ru,
Nikolay S. Otdelkin³ otdelkin.ns@vsuwt.ru

¹The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, ²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Technical University, ³Volga State University of Water Transport

Abstract. The article deals with the implementation of the method of forming a comprehensive assessment of the preference for choosing components of a ballast water filter based on the provisions of a fuzzy logical conclusion. A fuzzy production system is formed within the framework of the method. The system is based on the aggregation of the main parameters characterizing the state of the filter into a single assessment. The parameters include: assessment of the effectiveness of pollutant removal, as well as parameters characterizing the cost of implementing the filter and the safety of its operation. An experiment to evaluate the operability of the proposed provisions showed that the models have the necessary sensitivity in terms of the absence of the effect of "masking" unsatisfactory values of variables: the effectiveness of pollutant removal and filter safety, while changing the value of the filter cost variable allows you to compare different solutions in the field of filter implementation under other equal conditions. The proposed provisions make it possible to compile an ordered list of various solutions by forming a comprehensive assessment. The use of fuzzy production systems based on the Sugeno algorithm is preferable to the Mamdani algorithm. The results obtained

open up opportunities for further development of design tools for ballast water treatment systems on ships of various purposes and different navigation areas.

Key words: ballast water filters, evaluation of choice preference, ballast water filter components, fuzzy inference system, Sugeno algorithm

For citation: Lesya I. Golovackaya, Aleksandr A. Sorokin, Anna N. Tsyguta, Andrey E. Platinin, Nikolay S. Otdelkin Implementation of a method for forming a comprehensive assessment of the preference for choosing components of a ballast water filter based on the provisions of Fuzzy Logical inference. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 147—158. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.071

Введение

Устранение загрязнений водных поверхностей играет важную роль в обеспечении экологической безопасности судоходства [1-2]. Чистая вода необходима для сохранения здоровья экосистем и благополучия населения. Проблемы, возникающие при неконтролируемом переносе чужеродных организмов с судовым водяным балластом, отмечаются в работе исследователей [3]. Одной из важнейших экологических проблем Мирового океана является антропогенный перенос чужеродных морских организмов. Продолжаются исследовательские поиски новых компонентов для фильтров воды, что свидетельствует о стремлении улучшить технологии очистки.

Судовые балластные воды (БВ) и их осадки могут оказывать многообразное негативное воздействие на окружающую среду, включая биологическое, химическое и физическое. Поэтому мировым сообществом была разработана Конвенция [4] для контроля переноса и внесения вредных водных и патогенных организмов через БВ судов. Она требует от судов разработки плана контроля судовых БВ, специфичного для каждого судна и района плавания. Одной из наиболее эффективных мер по соблюдению положений конвенции является полная замена БВ в открытом море на расстоянии не менее 50 морских миль от ближайшего берега и на глубине не менее 200 метров. Альтернативными решениями могут быть методы обработки БВ для снижения содержания вредных организмов до определенных уровней для конкретных регионов мирового океана.

Практически все производители систем очистки БВ используют в технологическом процессе фильтрацию и обеззараживание ультрафиолетовым излучением (УФИ) или активным химическим реагентом [5]. Группа ученых [6] предложила метод для анализа эффективности блокирующего действия противоядий против воздействия токсичных веществ на клеточные мембраны, используя ранее разработанный программный комплекс [7]. Метод позволяет предсказать антидотные свойства молекул по отношению к широкому спектру токсичных и загрязняющих веществ, на основе этого метода разработана методика по подбору очистителей к загрязнителям БВ [8].

Обзор положений, представленных в [5-8] показывает, что основные усилия в рамках исследования направлены на выбор компонентов фильтра, которые обладают наиболее эффективной очищающей способностью, но на практике также требуется учет ряда дополнительных факторов, которые обуславливают общую эффективность эксплуатации фильтра как элемента системы очистки. Особенностью подобных факторов является то, что они оцениваются на разных метрологических шкалах и имеют различный уровень влияния на

итоговый результат. Анализ результатов исследований [5-8] показал, что этот вопрос комплексной оценки фильтров и их составных элементов требует дальнейшего развития. Как известно из работ [9-11] при формировании комплексных оценок на основе агрегирования разнородных факторов целесообразно использование положений основанных на теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода.

Поэтому целью работы является реализация метода формирования комплексной оценки предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод на основе положений нечеткого логического вывода.

1. Введение в предметную область

На основании анализа результатов ранее проведенных исследований [12-17] в процессе подбора очистителей фильтровой системы БВ можно выделить следующие основные этапы:

- (ОЭ-1) – квантовый расчет молекул и их взаимодействий.

В рамках реализации этапа выполняется подбор равновесной электронной структуры молекулы с учетом её геометрических и энергетических характеристик. Выполнение этапа с учетом [12-14] может осуществляться при помощи программного пакета General Atomic and Molecular Electronic Structure System (GAMESS). GAMESS предоставляет широкий спектр возможностей для моделирования электронной структуры, динамики и других процессов в атомных системах. Этот пакет содержит инструменты для расчета стандартных теплосмостей, энтальпий образования, энтропии и других термодинамических свойств. Поскольку программа GAMESS используется для прогнозирования химической устойчивости и равновесия систем, она получила активное применение в научных исследованиях, фармацевтической промышленности, материаловедении и других областях, где требуется моделирование сложных химических и физических процессов. Дополнительно в рамках настоящего этапа используются программные пакеты TFinG [15] и ROXMB [16]. Пакет TFinG упрощает взаимодействие с квантово-химическими программами и делает возможным автоматизацию расчетов. Программа ROXMB применяется для расчета основных характеристик межмолекулярных взаимодействий и позволяет анализировать процесс поиска активных центров при взаимодействии двух молекул [16].

- (ОЭ-2) – расчет эффективности очистителя.

На этом этапе проводится подбор антидотов (веществ, нейтрализующих действие загрязнителей) на основе анализа эффективности взаимодействия очистителей и загрязняющих веществ, что реализуется за счет использования программы

«Эффективность очистителя» и базы данных (БД) «АЦЗО» (активных центров загрязнителей по отношению к очистителю) [17]. БД «АЦЗО» содержит данные о загрязняющих веществах, которым сопоставлены вещества, их нейтрализующие, а также информацию о множестве активных центров загрязнителя по отношению к данному очистителю. На основании этой информации программа «Эффективность очистителя» проводит моделирование соотношений для каждой пары «очиститель-загрязнитель» и вычисляет для них коэффициент эффективности очистителя по формуле:

$$Ef_o = \frac{\sum_{i=1}^m k_i}{n}, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент значимости для i -го активного центра, в молекуле загрязнителя; m – количество активных центров загрязнителя, заблокированных данным очистителем; n – количество атомов в молекуле загрязнителя.

- (ОЭ - 3) – выбор наиболее предпочтительных компонентов фильтров БВ.

Реализация третьего этапа состоит в решении задачи оценки совокупности компонентов фильтров для балластных вод. Критериями оценки являются эффективность фильтра, стоимостные характеристики фильтра и параметры его безопасности.

Для агрегирования этапов ОЭ1-ОЭ3 составлена обобщенная IDEF0 диаграмма, которая представлена на рис. 1. Входными компонентами диаграммы являются химические характеристики

очистителей и загрязнителей, экономические и экологические характеристики компонентов фильтров для балластных вод. В качестве механизмов реализации этапов выступают теоретические положения и программные продукты, предназначенные для выполнения квантово-химических расчетов моделей молекул и их взаимодействий, расчетов эффективности очистителя и выбора наиболее предпочтительных компонентов фильтра.

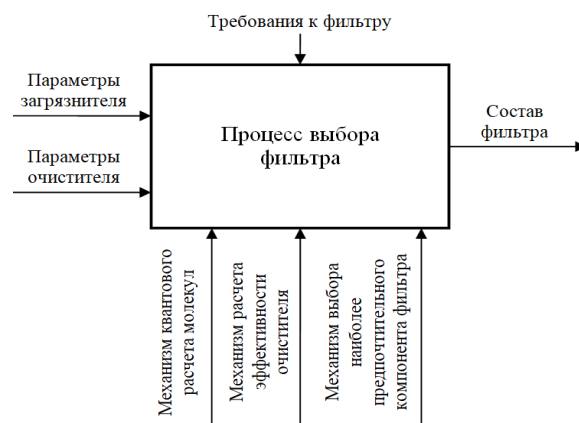


Рис. 1. Обобщенная IDEF0 диаграмма процесса выбора фильтра

Для улучшения понимания процессов, представленных на рис. 1, удобно рассмотреть детализированную IDEF0 диаграмму, показанную на рис. 2.



Рис. 2. Детализированная IDEF0 диаграмма процесса выбора фильтра

Наряду с основными этапами (ОЭ-1) – (ОЭ-3) требуется выполнение дополнительных этапов:

- (ДЭ-1) забор пробы БВ;

- (ДЭ-2) формирование списков загрязнителей и реагентов для очистки БВ;

- (ДЭ-3) запросы к базам данных (БД), содержащим информацию, необходимую для выполнения проводимых расчетов.

Реализация процессов, представленных на рис. 2, начинается с забора проб воды, это осуществляется с помощью ручных или автоматических пробоотборников. После этого происходит выявление загрязнителей, присутствующих в пробе. К загрязнителям могут относиться органические соединения (пестициды, фенолы, нефтепродукты и т.д.) и неорганические вещества (тяжелые металлы, нитраты, фосфаты и др.). На основе информации о выявленных загрязнителях выбираются наиболее эффективные реагенты для их удаления. В результате список загрязнителей и список очищающих реагентов подается на вход программного комплекса, используемого в рамках этапа (ОЭ-1) «Квантовый расчет молекул и кристаллов». Затем проводится выполнение этапа (ОЭ-2), в результате формируется оценка эффективности очищающей способности компонентов фильтра БВ, после этого проводится учет дополнительных факторов, влияющих на оценку комплексной эффективности фильтра БВ с учетом специфики объекта, где планируется его реализация.

Анализ [8, 12-17] показывает, что вопрос реализации этапов (ОЭ-1) и (ОЭ-2) достаточно изучен и для их решения имеются программные пакеты или разработанные математические методы, тогда как вопрос реализации (ОЭ-3) требует дальнейшего развития. Как показывает анализ [9] формирование комплексных оценок различных объектов осложняется следующими факторами:

- (Ф-1) формирования набора критериев, на основании которых будет рассчитываться комплексная оценка;

- (Ф-2) формирования оператора, который будет агрегировать критерии в комплексную оценку.

Особенностями факторов, которые влияют на оценку комплексной эффективности, являются:

- (О-1) факторы могут описываться на различных метрологических шкалах,

- (О-2) иметь разный диапазон значений,

- (О-3) иметь разный уровень влияния на итоговый результат,

- (О-4) сведения о результате взаимодействия факторов могут храниться в виде экспертных знаний, а не накопленных ранее статистических данных.

Наличие подобной специфики порождает ряд неопределенностей, что затрудняет использовать «классические» методы агрегирования параметров, основанных на формировании интегральных оценок с использованием различных мультипликативных или аддитивных сверток. В результате сильно осложняется реализация метода получения комплексной оценки фильтра.

2. Формирование комплексной оценки фильтра балластных вод

Как показывает анализ работ [10, 11, 18-21] для решения задачи агрегирования переменных, которые имеют различный, в том числе нелинейный уровень влияния на выходную переменную, а так же различные виды корреляции с выходной переменной достаточно широкое применение нашли методы, основанные на положении теории нечетких множеств (ТНМ). В результате использования положений ТНМ

формируется нечеткая продукционная система (НПС), которая позволяет агрегировать разнообразные входные переменные в определенную оценку. Таким образом, представленный метод формирования комплексной оценки фильтра БВ основывается на использовании НПС, которая будет агрегировать необходимый набор показателей.

Сущность положений по формированию НПС заключается в том, что диапазон значений входных x и выходных y переменных разделяется на несколько интервалов, соответственно $x_{\text{инт},i_x}$ и $y_{\text{инт},j_y}$, i_x и j_y – номера интервалов применительно к заданным переменным. У переменной x эти интервалы преимущественно пересекающиеся, а у переменной y характер этих интервалов зависит от специфики алгоритма, по которому происходит обработка входных переменных. Каждому интервалу в соответствие ставится терм τ_x (для входных переменных), τ_y (для выходных переменных). Термы семантически описывают состояние переменной заданной переменной. Каждому терму в соответствие ставится функция принадлежности (ФП) $\mu_{\tau_x}(x)$ или $\mu_{\tau_y}(y)$. В результате выполнения ФП четкое значение переменной преобразуется в нечеткое x_{fuzz} , что на примере переменной x можно представить в виде:

$$x_{\text{fuzz}} = \mu_{\tau_x}(x). \quad (2)$$

Область определения ФП задается протяженностью интервалов $x_{\text{инт},i_x}$ или $y_{\text{инт},j_y}$, а область значений описывает степень принадлежности переменной к определенному терму и изменяется от 0 до 1. При этом если значение переменной x или y равно 0, то это означает полное не соответствие семантическому значению заданного терма. Чем ближе значение переменной к 1, тем больше степень соответствия семантического значения к заданному значению терма.

Форма ФП определяется экспертной группой. Агрегирование входных переменных выполняется при помощи продукционных правил вида:

$$p: g_p(x_{\text{fuzz},1} = t_{x_i,1}, \dots, x_{\text{fuzz},n} = t_{x_i,n}) \Rightarrow (y_{\text{fuzz}} = t_y), \xi_p \quad (3)$$

где p – номер заданного правила, n – число переменных внутри правила, g – оператор агрегирования входных переменных для данного правила, $x_{\text{fuzz},i}$ – нечеткое значение входной переменной, $t_{x_i,i}$ – лингвистическое значение терма, описывающего состояние переменной $x_{\text{fuzz},i}$, t_y – лингвистическое значение терма, описывающего состояние выходной переменной y_{fuzz} , ξ – коэффициент доверия к правилу (изменяется от 0 до 1 и определяется экспертом, который формирует правило). В качестве оператора g , как правило, выступают операции логического «И» либо «ИЛИ». В рамках исследований для агрегирования параметров, характеризующих состояние фильтра, используется операция логического «И». Совокупность соотношений (4) образуют базу правил (БП). В результате обработки БП формируется выходное значение y_{out} . Подобное можно описать соотношением:

$$F_{\text{бпх}} \left(g_p(x_{\text{fuzz},1} = t_{x_i,1}, \dots, x_{\text{fuzz},n} = t_{x_i,n}) \Rightarrow (y_{\text{fuzz}} = t_y), \xi_p \right) = y_{\text{out}} \quad (4)$$

где $F_{вых}$ – оператор для получения результатов, которые каждое из правил p формирует по отдельности.

Формальная реализация операторов g_p и $F_{вых}$ определяется видом алгоритма нечеткого вывода. С учетом [10] наиболее широкое распространение получили алгоритмы Мамдани (АМ) и Сугено (АС). Отличительными признаками этих алгоритмов являются:

- Описание выходных переменных. В АМ описание выходных переменных проводится с использованием набора ФП, аналогичных тем что используются при описании входных переменных. В АС для описания выходных переменных используются полиномы (как правило, 0-го или 1-го порядков).

- Особенности формирования оператора агрегирования g_p . Если в правиле используется операции логического «И», то в АМ они реализуются при помощи вычисления минимума степеней принадлежности значений входных переменных, к соответствующим термам. В АС данная операция основана на перемножении этих степеней принадлежности.

- Для получения выходного значения в АМ сначала проводится объединение ФП выходной переменной, полученной в результате активации правил базы знаний НПС, в итоговую фигуру, а потом выполняется вычисление центра тяжести этой фигуры. Применительно к АС выходное значение определяется за счет расчета взвешенной суммы выходных значений ФП, полученных с учетом значения полинома и результата агрегирования степеней принадлежности входных переменных.

Анализ показывает, что методологическим преимуществом АМ является, то, что выходная переменная описывается естественным способом, где в зависимости от величины значения переменной определяется ее принадлежность к определенному терму, тогда как у АС для этого используются абстрактные полиномы. С другой стороны у АС при вычислении значения выходной переменной используется одна операция – взвешенная сумма значений ФП выходных переменных, с учетом агрегированного значения входных переменных по каждому правилу. Тогда как у АМ сначала формируется фигура итоговой ФП, после чего определяется ее центр тяжести, который проецируется на ось «естественных» значений выходной переменной. Поэтому в рамках проводимых исследований отдельный интерес представляет сравнительный анализ этих алгоритмов и формирование рекомендации о целесообразности использования определенного алгоритма при проведении комплексной оценки фильтров БВ.

С учетом [22-24] функционал для определения комплексной оценки фильтра представлен в виде:

$$M_{\text{фильтр}} = F_{\text{фильтр}}[x_{\text{эуз}}, x_3, x_B] \quad (5)$$

где $x_{\text{эуз}}$ – оценка эффективности удаления загрязнителя, x_3 – оценка экономичности заданного

очистителя, x_B – безопасность фильтра, $F_{\text{фильтр}}$ – оператор агрегирования переменных $x_{\text{эуз}}$, $x_{\text{Ц}}$, x_B , $M_{\text{фильтр}}$ – показатель эффективности. В рамках предлагаемых положений принимается, что для оценивания переменных $x_{\text{эуз}}$, $x_{\text{Ц}}$, x_B используется величина в диапазоне от 0 до 100 ед. Выбор подобной единицы оправдан тем, что:

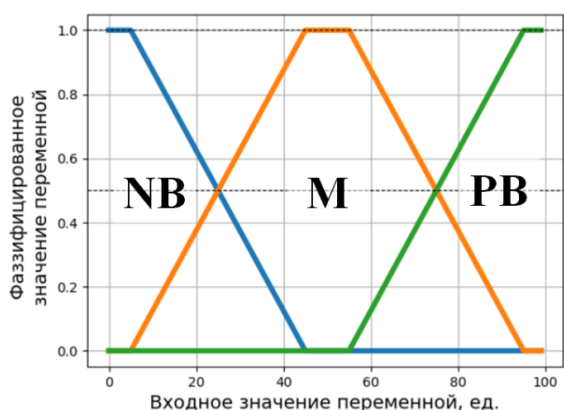
- параметр $x_{\text{эуз}}$ определяется как комплексная характеристика, которая с учетом вышеописанных исследований зависит от таких параметров как количество блокированных очистителем атомов загрязнителя, энергетических и геометрических параметров, получаемых в результате квантовохимических расчетов межмолекулярных взаимодействий;

- параметр x_B так же может рассчитываться как комплексная характеристика, зависящая от величины токсичности компонентов очистителя, либо определяться экспертным методом, с учетом мнений специалистов соответствующей области знаний и специфики задач, для которых фильтр используется;

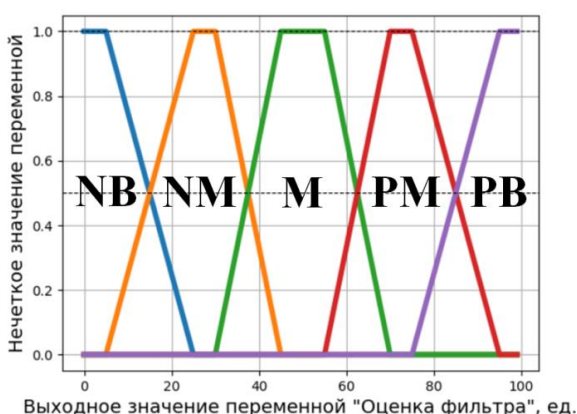
- параметр x_3 так же целесообразно, в рамках модели, описывать при помощи относительных величин поскольку это повышает инвариантность модели в плане использования к оценке различных типов фильтров предназначенных для разных объектов, а так же нестабильностью курсовой стоимости различных денежных единиц.

Дополнительной спецификой переменных является различный, в т.ч. и нелинейный уровень влияния на итоговый результат. Это объясняется тем, что низкая эффективность фильтра, не оправдывает его использования даже при невысокой стоимости и высокой безопасности, тогда как высокая эффективность может оправдать высокие затраты на его реализацию и эксплуатацию, а так же сравнительно низкую безопасность. Для повышения безопасности использования определенной модели фильтра могут быть применены дополнительные меры защиты. Так же определенную трудность вызывает специфика оценочных шкал, которая используется для описания переменных. Условная единица, фактически является ранговой оценкой, хотя её значениями могут быть и дробные числа. Например, это объясняется спецификой расчета величин $x_{\text{эуз}}$ и x_B , и тем, что параметр x_3 с учетом [25 – 27] может включать в себя дополнительные факторы, связанные со спецификой эксплуатации устройства. Кроме этого, переменные $x_{\text{эуз}}$, x_3 и x_B имеют различные виды корреляций с выходной оценкой $M_{\text{фильтр}}$. Переменные $x_{\text{эуз}}$ и x_B имеют положительную корреляцию, т.е. чем выше значение этих переменных, тем выше показатель эффективности $M_{\text{фильтр}}$, тогда как x_3 имеет отрицательную корреляцию, т.е. увеличение стоимости отрицательно сказывается на общей комплексной оценке предпочтения выбора компонентов фильтра балластных вод.

С учетом (5) НПС агрегирует три переменных, диапазон описания которых изменяется от 0 до 100 ед. Для описания этих переменных предлагается использовать трапециевидные ФП, которые показаны на рис. 3. ФП переменных $x_{\text{эуз}}$, $x_{\text{ц}}$ и $x_{\text{б}}$ показана на рис. 3 а., ФП переменной y_{out} , которые используются для НПС на основе АМ показаны на рис. 3 б. Семантические значения термов для переменных следующие: NB – плохо, NM – скорее плохо, M – среднее, PM – скорее хорошее, PB – хорошее. Для описания y_{out} в НПС на основе АС используется набор постоянных величин, относительно значений термов соответствие следующие: NB ~ 0, NM ~ 25, M ~ 50, PM ~ 75, PB ~ 100 ед.



а.



б.

Рис. 3 Вид функций принадлежности переменных у НПС

Основная часть правил вида (2) формируются по принципу, что значение терма выходной переменной эквивалентно худшему семантическому значению термов, используемых для описания входных переменных. В случае необходимости с учетом [10] допускается использование правил со слабой несовместимостью. В [10] под слабой несовместимостью понимается случай, когда два

правила имеют одинаковые комбинации термов входных переменных, но разные значения термов выходных переменных, при этом используемые термы выходной переменной являются соседними, а сумма коэффициентов доверия таких правил равняется единице. Пример подобных правил применительно к разрабатываемой НПС имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p_{18.1}: (x_{fuzz,1} = M) \wedge (x_{fuzz,1} = PB) \wedge (x_{fuzz,1} = PB) &\Rightarrow \\
 &\Rightarrow (y_{fuzz} = M), \xi_{18.1} = 0.25 \\
 p_{18.2}: (x_{fuzz,1} = M) \wedge (x_{fuzz,1} = PB) \wedge (x_{fuzz,1} = PB) &\Rightarrow \\
 &\Rightarrow (y_{fuzz} = PM), \xi_{18.2} = 0.75
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В остальных случаях коэффициент доверия правил равнялся единице.

Сформированная БП обладала лингвистической и численной полнотой, что означает:

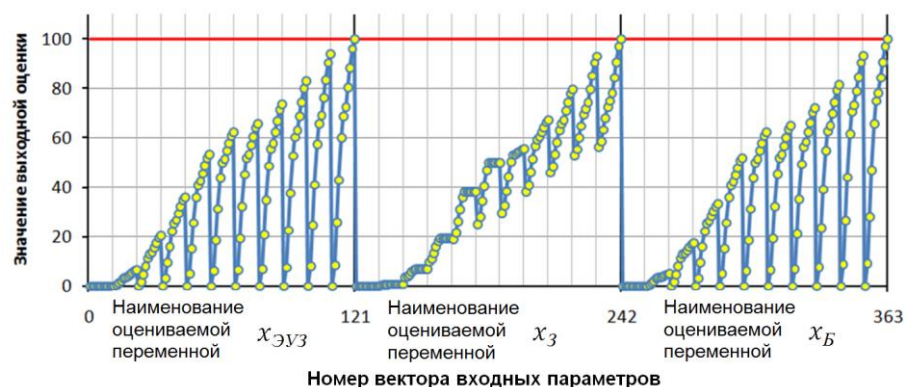
- для любой комбинации термов входных переменных имеется выходное значение в виде терма выходной переменной;
- в результате функционирования НПС для любой комбинации численных значений выходной переменной в пределах установленных диапазонов формируется численное значение выходной переменной.

В рамках эксперимента исследуемые НПС на основе алгоритмов Мамдани и Сугено реализованы с использованием языка программирования Python. После этого для исследуемых НПС проведена оценка чувствительности и оценка способности распознать различные ситуации, которые описывают состояние исследуемого фильтра. В рамках реализации НПС получены объекты интеллектуальной собственности на базу данных [28] и систему оценки состояния фильтра [29].

С учетом того, что диапазон значений переменных изменяется от 0 до 100 единиц, оценка чувствительности проводилась следующим образом:

п. 1. Задается значение первой переменной 0 ед. значение второй и третьей переменной так же 0 ед. выполняется вычисление выходного значения НПС затем значение первой переменной увеличивается на 10 ед., значения второй и третьей переменной не изменяется, снова вычисляется выходное значение НПС, подобное увеличение на 10 ед. для первой переменной продолжается пока не будет достигнуто ее максимальное значение 100 ед., после этого ее значение снова приравнивается к 0 единиц, а значение второй и третьих переменных увеличивается на 10 ед., подобное повторяется до тех пор пока значения всех переменных не станут равными 100 ед.

п. 2. Последовательность операций описанных в (п. 1) повторяется для второй и третьей переменных. В результате формируются по 3 закономерности для каждого типа НПС. Закономерность, сформированная при помощи НПС на основе АС показана на рис. 4 а. Закономерность, сформированная при помощи НПС на основе АМ показана на рис. 4 б.



а.



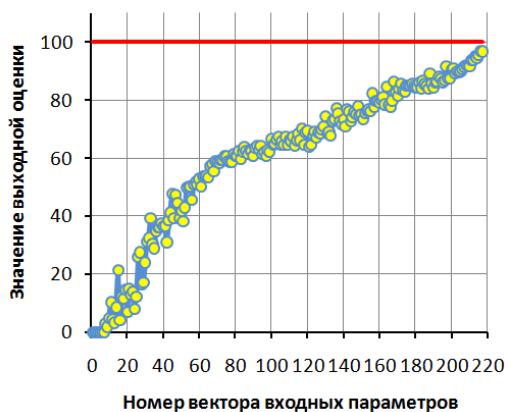
б.

Рис. 4 Результат проверки чувствительности исследуемых НПС

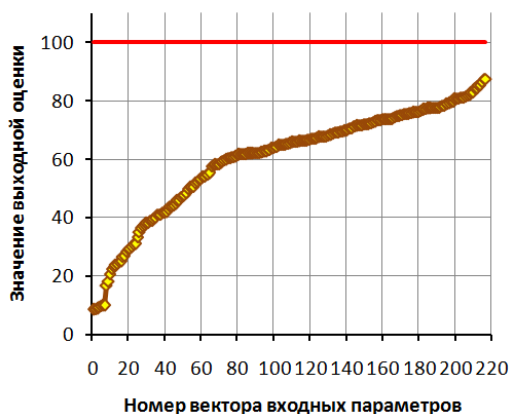
Анализ рис. 4 показывает, что НПС обладает повышенной чувствительностью к изменениям значений переменных, описывающих эффективность действия фильтра на удаление загрязнителя – $x_{ЭУЗ}$, а также на безопасность применения фильтра – $x_Б$. К изменению стоимости фильтра система менее чувствительна, подобное объясняется тем, что при высокой эффективности удаления загрязнителя и безопасности использования фильтра, затраты на его реализацию не являются доминирующим показателем. Однако данный показатель оказывает влияние на предпочтение выбора определенного решения при прочих равных условиях. При этом следует отметить, что диапазон значений выходных

переменных у НПС на основе АМ уже, чем у НПС на основе АС на $\approx 17\%$.

В рамках второй серии экспериментов проверялась способность исследуемых НПС ранжировать множество фильтров по показателю комплексной эффективности. Всего было сформировано 217 образцов. Каждый из образцов характеризовался вектором из трех элементов $\langle x_{ЭУЗ}, x_Ц, x_Б \rangle$, значение каждого из которых формировалось в виде случайного числа из диапазона от 0 до 100 ед. Результат ранжирования при помощи НПС на основе АС показан на рис. 5 а. Результат ранжирования при помощи НПС на основе АМ показан на рис. 5 б.



а.



б.

Рис. 5 Ранжирование различных фильтров по комплексной эффективности

Как видно из рис. 5 обе НПС справились с поставленной задачей, коэффициент корреляции между закономерностями на рис. 5 а. и 5 б. составил $\approx 0,99$, что говорит об их идентичности. При этом диапазон значений у НПС на основе АМ меньше чем у НПС на основе АС на $\approx 18\%$. Учитывая, что НПС на основе алгоритмов АС и АМ дают идентичные результаты, при этом НПС на основе алгоритма АС используют меньшее количество математических операций, чем НПС на основе АМ, то при дальнейшей реализации метода формирования комплексной оценки фильтра БВ использование НПС на основе АС более предпочтительно, чем использование НПС на основе АМ.

Выводы

В данной работе, в рамках задачи очистки балластных вод, реализован метод формирования комплексной оценки фильтрующих элементов, метод основан на использовании положений нечеткого логического вывода. В рамках метода формируется нечеткая продукционная система, которая агрегирует основные параметры, характеризующие состояние фильтра в единую оценку. В число учитываемых параметров входит: оценка эффективности удаления загрязнителя (определяется на основе выполнения квантовых расчетов необходимых параметров очистителей и определения их эффективности по удалению загрязнителя), а также параметры характеризующие затраты на реализацию фильтра и безопасность его эксплуатации.

Поведенный эксперимент по оцениванию работоспособности предложенных положений показал, что модели обладают необходимой чувствительностью в части отсутствия эффекта «маскирования» неудовлетворительных значений переменных $x_{\text{эуз}}$ (эффективность удаления загрязнителя) и $x_{\text{Б}}$ (безопасность фильтра), при этом изменение значения переменной $x_{\text{Ц}}$ (стоимость фильтра) позволяет сравнивать различные решения

в области реализации фильтра при иных равных условиях; предложенные положения позволяют ранжировать различные решения за счет формирования комплексной оценки; использование НПС на основе алгоритма Сугено более предпочтительно относительно НПС на основе алгоритма Мамдани.

Предпочтение в использовании НПС на основе алгоритма Сугено над НПС на основе алгоритма Мамдани объясняется тем, что: НПС на основе алгоритма Сугено используют меньшее количество действий для получения выходной оценки при этом обеспечивают идентичную точность относительно НПС на основе алгоритма Мамдани; выходная оценка у НПС на основе алгоритма Сугено полностью покрывает диапазон допустимых значений от 0 до 100 ед. (эксперимент по оценке чувствительности) и от 0 до 96,91 ед. (эксперимент по оценке ранжирующей способности), тогда как выходная оценка у НПС на основе алгоритма Мамдани в рамках экспериментов имела диапазон значений в пределах от 8,32 до 91,68 (эксперимент по оценке чувствительности) и от 8,57 до 87,64 (эксперимент по оценке ранжирующей способности). В рамках исследуемой выборки проведен анализ количества разнообразных значений выходной оценки, что говорит о способности вычислительных систем распознать различные ситуации при анализе исследуемых фильтров. НПС на основе алгоритма Сугено распознала 229 разнообразных ситуаций при оценке чувствительности и 198 ситуаций при ранжировании объектов анализа, тогда как НПС на основе алгоритма Мамдани распознала разнообразных 137 ситуаций при оценке чувствительности и 194 ситуаций при ранжировании объектов анализа.

Таким образом, полученные результаты открывают возможности дальнейшего развития средств проектирования систем очистки балластных вод на судах различного назначения и разных районов плавания.

Литература

1. Головацкая, Л.И. Оценка площади нефтяного загрязнения при разливах газового конденсата в Каспийском море / Л.И. Головацкая, А.Н. Бородин, А. Е. Пластинин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 315-319. – DOI 10.37220/MIT.2023.60.2.039. – EDN MEQVPB
2. Каленков, А. Н. Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне / А. Н. Каленков, А. Е. Пластинин // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 216-228. – DOI 10.37890/jwt.vi74.341. – EDN YLZIGA
3. Береза, И. Г. Создание приемных портовых сооружений обработки балластных вод / И. Г. Береза, А. А. Иванченко, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1-2(43). – С. 36-40. – EDN PBAWQX.
4. Международная Конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими / Дипломатическая конференция, 2004. – М.: МОРКНИГА, 2005. – 120 с.
5. Сагайдак А.И. Проблема водяного балласта и пути ее решения / А.И. Сагайдак // Вестник ОДМА. – 2008. – № 2. – С. 81–94., Система очистки балластной воды компании RWO // Veolia water / Морская техника – 2011. – № 9. – 20 с.; ил., Сустретова Н.В. Обеспечение экологической безопасности балластных вод на судах смешанного «река-море» плавания. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Н.Новгород: ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. – 24 с
6. Садретдинов Д.Р., Жарких Л.И. Анализ эффективности антидотов к токсическому воздействию на клеточную мембрану // Математика и математическое моделирование: Сборник материалов XIV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы, Саров, 07–09 апреля 2020 года. – Саров: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2020. С. 330-331.
7. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ №2011611798. Автоматизация расчетов основных энергетических и зарядовых характеристик при моделировании межмолекулярных взаимодействий / Жарких (Головацкая) Л.И., Очередко Ю. А., Алыков Н. М., Малев А. А. - Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 28.02.2011.

8. Цыгута, А. Н. Изучение процессов образования моделей при взаимодействии молекул очистителя и загрязнителя на примере сероводорода и аспарагина / А. Н. Цыгута, Л. И. Головацкая // Каспийский научный журнал. – 2024. – № 1(2). – С. 66-75. – EDN QEMKKS.
9. Паклин, Н. Бизнес-аналитика. От данных к знаниям / Н. Паклин, В. Орешков. Монография – Изд-во: Питер, 2009. – 622 с.
10. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат – Бином. Лаборатория знаний, 2017. – 800 с.
11. Истомин, Д. А. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики / Д. А. Истомин, В. Ю. Столбов, Д. Н. Платон // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 133-143. – DOI 10.14529/ctcr200113. – EDN EPYMAU.
12. High-performance strategies for the recent MRSF-TDDFT in GAMESS / K. Komarov, V. Mironov, S. Lee [et al.] // Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 158, No. 19. – DOI 10.1063/5.0148005. – EDN DPDOHI,
13. Bocharnikova, E. N. Construction of optical spectra of some substituted phenols with GAMESS/Tinker / E. N. Bocharnikova, O. N. Tchaikovskaya, V. A. Pomogaev // Pulsed lasers and laser applications : Materials of the 16th International Conference AMPL-2023, Tomsk, 10–15 сентября 2023 года. – Tomsk: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2023. – Р. 143. – EDN XCVXBI,
14. Юсупов, А. И. Использование расчетных методов квантовой химии для создания моделей взаимодействий в нефтяных дисперсных системах / А. И. Юсупов, Л. Б. Кириллова, К. П. Пашенко // Технологии нефти и газа. – 2017. – № 1(108). – С. 15-19. – EDN XWRIWH.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614450 Российская Федерация. ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ "TFinG" : № 2022613564 : заявл. 15.03.2022 : опубл. 22.03.2022 / Ю. А. Смирнова, Л. И. Головацкая ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта». – EDN CDZIPC.
16. Смирнова, Ю. А. Алгоритмы поиска активных центров межмолекулярного взаимодействия / Ю. А. Смирнова, Л. И. Жарких // Вестник Технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 104-111. – EDN NEKXAJ.
17. Цыгута, А. Н. Разработка базы данных по загрязняющим веществам с учетом эффективности противоядий / А. Н. Цыгута, Л. И. Головацкая, А. Е. Пластинин // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 7(283). – С. 34-41. – EDN FQXVXE.
18. Жигалов, И. Е. Экспертная система диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции / И. Е. Жигалов, О. И. Моногаров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 51-59. – DOI 10.14529/ctcr200105. – EDN AIJNGU.
19. Интеллектуальная поддержка принятия решений в экспертных системах при диагностике заболеваний полости рта / Н. А. Семенов, Г. Б. Бурдо, С. Н. Лебедев, Ю. В. Лебедева // Программные продукты и системы. – 2021. – № 3. – С. 484-488. – DOI 10.15827/0236-235X.135.484-488. – EDN BNHYFZ.
20. Jaildo Jackson do Amaral MoreiraJorge De Almeida Brito JúniorManoel Henrique Reis NascimentoJandecy Cabral Leite Application of Fuzzy inference systems for preliminary analysis of the technical requirements of permission holders for the repair and maintenance of regulated measuring instruments June 2024Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review) 15(6):e3947 15(6):e3947 DOI:10.7769/gesec.v15i6.3947
21. S. Ponsadai Lakshmi, C. Gopi, Adwin Jose P E.G.S. Pillay Engineering College Mamdani-type fuzzy inference system for irrigational water quality // Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences DOI:10.46481/jnsps.2024.1890
22. Андрюшечкин Ю.Н., Столповский Д.Ю., Рудых С.В. Анализ технических характеристик при выборе систем обработки балластных вод для судов "река - море" плавания // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 6. С. 1191-1199.
23. Урецкий Е.А., Николенко И.В., Мороз В.В. Разработка, внедрение и исследование многоцелевого сорбционного аппарата // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 24 (76). С. 85-95.
24. Неверов Е.Н., Горелкина А.К., Михайлова Е.С., Тимошук И.В., Схаплок Р.Ю. Проект установки для очистки шахтных вод угольного разреза // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 169-178.
25. Овчинников А.С., Бочарников В.С., Денисова М.А., Бочарникова О.В., Козинская О.В. Сравнительная экономическая оценка различных природных сорбентов для очистки сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2 (58). С. 65-72.
26. Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Эколого-экономическая эффективность технологических процессов очистки сточных вод // Сервис в России и за рубежом. 2015. Т. 9. № 4 (60). С. 112-121.
27. Некрасова Т.П., Крючихина А.Е. Экономическая эффективность применения системы очистки сточных вод // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2012. № 2-1 (144). С. 64-72.
28. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624025 Российская Федерация. База правил для оценки предпочтительности выбора очищающих компонентов фильтров балластных вод: № 2024623603 : заявл. 21.08.2024 : опубл. 10.09.2024 / А. Н. Цыгута, А.А. Сорокин, А.Е. Пластинин, Л.И. Головацкая; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волжский государственный университет водного транспорта"
29. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024680137 Российская Федерация. Нечеткая продукционная система автоматизированного подбора наиболее предпочтительных компонентов

фильтров балластных вод: № 2024669397 : заявл. 21.08.2024 : опубл. 26.08.2024 / А. Н. Цыгута, А.А. Сорокин, А.Е. Пластинин, Л.И. Головацкая; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Волжский государственный университет водного транспорта"

References

1. Golovackaya, L.I. Ocenka ploshchadi neftyanogo zagryazneniya pri razlivah gazovogo kondensata v Kaspijskom more [Assessment of the area of oil pollution caused by gas condensate spills in the Caspian Sea] / L.I. Golovackaya, A.N. Borodin, A. E. Plastinin // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2023. – № 2-1(60). – S. 315-319. – DOI 10.37220/MIT.2023.60.2.039. – EDN MEQVPB
2. Kalenkov, A. N. Prognozirovanie razlivov nefti s sudov v Amurskom bassejne [Forecasting of oil spills from ships in the Amur basin] / A. N. Kalenkov, A. E. Plastinin // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2023. – № 74. – S. 216-228. – DOI 10.37890/jwt.vi74.341. – EDN YLZIGA
3. Bereza, I. G. Sozdanie priemnykh portovykh sooruzhenij obrabotki ballastnykh vod [Creation of receiving port facilities for ballast water treatment] / I. G. Bereza, A. A. Ivanchenko, M. A. Modina // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – № 1-2(43). – S. 36-40. – EDN PBAWQX.
4. Mezhdunarodnaya Konvenciya o kontrole sudovykh ballastnykh vod i osadkov i upravlenii imi [International Convention on the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments] / Diplo-maticheskaya konferenciya, 2004. – M.: Morkniga, 2005. – 120 s.
5. Sagajdak A.I. Problema vodyanogo ballasta i puti ee resheniya [The problem of ballast water and ways to solve it] / A.I. Sagajdak // Vestnik ODMA. – 2008. – № 2. – S. 81–94., Sistema ochistki ballastnoj vody kompanii RWO /Veolia water / Morskaya tekhnika – 2011. – № 9. – 20 s.; il., Sustretova N.V. Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti ballastnykh vod na sudah smeshannogo «reka-more» plavaniya. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – N.Novgorod: FBOU VPO «VGAVT», 2011. – 24 s
6. Sadretdinov D.R., Zharkih L.I. Analiz effektivnosti antidotov k toksicheskomu vozdeystviyu na kle-tochnuyu membranu [Analysis of the effectiveness of antidotes to toxic effects on the cell membrane] // Matematika i matematicheskoe modelirovanie: Sbornik materialov XIV Vseros-sijskoj molodezhnoj nauchno-innovacionnoj shkoly, Sarov, 07–09 aprelya 2020 goda. – Sarov: Nacio-nal'nyj issledovatel'skij yadernyj universitet "MIFI", 2020. S. 330-331.
7. Svidetel'stvo o gos. registracii programm dlya EVM №2011611798. Avtomatizaciya raschetov osnovnykh energeticheskikh i zaryadovykh harakteristik pri modelirovanii mezhmolekulyarnykh vzaimodejstvij [Automation of calculations of basic energy and charge characteristics in modeling intermolecular interactions] / Zharkih (Golovackaya) L.I., Ocheredko Yu. A., Alykov N. M., Malev A. A. - Zaregistr. v reestre programm dlya EVM 28.02.2011.
8. Cyguta, A. N. Izuchenie processov obrazovaniya modelej pri vzaimodejstvii molekul ochistitelya i zagryaznitelya na primere serovodoroda i asparagina [Studying the processes of model formation in the interaction of cleaner and pollutant molecules using the example of hydrogen sulfide and asparagine] / A. N. Cyguta, L. I. Golovackaya // Kaspijskij nauchnyj zhurnal. – 2024. – № 1(2). – S. 66-75. – EDN QEMKKS.
9. Paklin, N. Biznes-analitika. Ot dannykh k znaniyam [Business analytics. From data to knowledge] / N. Paklin, V. Oreshkov. Monografiya – Izd-vo: Pi-ter, 2009. – 622 s.
10. Pegat, A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control] / A. Pegat – Binom. Laboratoriya znaniy, 2017. – 800 s.
11. Istomin, D. A. Ekspertnaya sistema ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov elektrocentrobezhnykh naso-sov na osnove produkcionnogo predstavleniya znaniy i nechetkoj logiki [An expert system for assessing the technical condition of electric centrifugal pump assemblies based on the production representation of knowledge and fuzzy logic] / D. A. Istomin, V. Yu. Stolbov, D. N. Platon // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika. – 2020. – T. 20, № 1. – S. 133-143. – DOI 10.14529/ctcr200113. – EDN EPYMAU.
12. High-performance strategies for the recent MRSF-TDDFT in GAMESS / K. Komarov, V. Mironov, S. Lee [et al.] // Journal of Chemical Physics. – 2023. – Vol. 158, No. 19. – DOI 10.1063/5.0148005. – EDN DPDOHI,
13. Bocharnikova, E. N. Construction of optical spectra of some substituted phenols with GAMESS/Tinker / E. N. Bocharnikova, O. N. Tchaikovskaya, V. A. Pomogaev // Pulsed lasers and laser applications : Materials of the 16th International Conference AMPL-2023, Tomsk, 10–15 sentyabrya 2023 goda. – Tomsk: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "STT", 2023. – P. 143. – EDN XCVXBI,
14. Yusupov, A. I. Ispol'zovanie raschetnykh metodov kvantovoj himii dlya sozdaniya modelej vzaimodejstvij v neftnykh dispersnykh sistemah [Using computational methods of quantum chemistry to create models of interactions in petroleum dispersed systems] / A. I. Yusupov, L. B. Kirillova, K. P. Pashchenko // Tekhnologii nefti i gaza. – 2017. – № 1(108). – S. 15-19. – EDN XWRIWH.
15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2022614450 Rossiyskaya Fede-raciya. PROGRAMMA DLYa EVM "TFinG" [COMPUTER PROGRAM "TFinG"] : № 2022613564 : yayavl. 15.03.2022 : opubl. 22.03.2022 / Yu. A. Smirnova, L. I. Golovackaya ; yayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta». – EDN CDZIPC.
16. Smirnova, Yu. A. Algoritmy poiska aktivnykh centrov mezhmolekulyarnogo vzaimodejstviya [Algorithms for searching for active centers of intermolecular interaction] / Yu. A. Smirnova, L. I. Zharkih // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. – 2020. – T. 23, № 1. – S. 104-111. – EDN NEKXAJ.

17. Cyguta, A. N. Razrabotka bazy dannyh po zagryaznyayushchim veshchestvam s uchetom effektivnosti protivoyadij [Development of a database on pollutants, taking into account the effectiveness of antidotes] / A. N. Cyguta, L. I. Golovackaya, A. E. Plastinin // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. – 2024. – № 7(283). – S. 34-41. – EDN FQXVXE.
18. Zhigalov, I. E. Ekspertnaya sistema diagnostiki prichin obrazovaniya opasnyh mikrodefektov v kabel'noj izolyacii [An expert system for diagnosing the causes of dangerous microdefects in cable insulation] / I. E. Zhigalov, O. I. Monogarov // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika. – 2020. – T. 20, № 1. – S. 51-59. – DOI 10.14529/ctcr200105. – EDN AIJNGU.
19. Intellektual'naya podderzhka prinyatiya reshenij v ekspertnyh sistemah pri diagnostike zabolevanij polosti rta [Intelligent decision support in expert systems for the diagnosis of oral diseases] / N. A. Semenov, G. B. Burdo, S. N. Lebedev, Yu. V. Lebedeva // Programmye produkty i sistemy. – 2021. – № 3. – S. 484-488. – DOI 10.15827/0236-235X.135.484-488. – EDN BNHYFZ.
20. Jaildo Jackson do Amaral Moreira Jorge De Almeida Brito Júnior Manoel Henrique Reis Nascimento Jandecy Cabral Leite Application of Fuzzy inference systems for preliminary analysis of the technical requirements of permission holders for the repair and maintenance of regulated measuring instruments June 2024 Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review) 15(6):e3947 15(6):e3947 DOI:10.7769/gesec.v15i6.3947
21. S. Ponsadai Lakshmi, C. Gopi, Adwin Jose P E.G.S. Pillay Engineering College Mamdani-type fuzzy inference system for irrigation water quality // Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences DOI:10.46481/jnsps.2024.1890
22. Andryushechkin Yu.N., Stolpovskij D.Yu., Rudyh S.V. ANALIZ TEHNICHESKIH HARAKTERISTIK PRI VYBORE SISTEM OBRABOTKI BALLASTNYH VOD DLYa SUDOV "REKA - MORE" PLAVANIYa [Analysis of technical characteristics when choosing ballast water treatment systems for river-sea navigation vessels] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S.O. Makarova. 2018. T. 10. № 6. S. 1191-1199.
23. Ureckij E.A., Nikolenko I.V., Moroz V.V. RAZRABOTKA, VNEDRENIE I ISSLEDOVANIE MNOGOCE-LEVOGO SORBCIONNOGO APPARATA [Development, implementation and research of a multipurpose sorption apparatus] // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2022. № 24 (76). S. 85-95.
24. Neverov E.N., Gorelkina A.K., Mihajlova E.S., Timoshchuk I.V., Skhaplok R.Yu. PROEKT USTANOVKI dlya ochistki shahtnyh VOD UGOL'NOGO RAZREZA [PROJECT OF A COAL MINE WATER TREATMENT PLANT] // Polzunovskij vestnik. 2024. № 1. S. 169-178.
25. Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Denisova M.A., Bocharnikova O.V., Kozinskaya O.V. SRAVNITEL'NAYa EKONOMICHESKAYa OCENKA RAZLICHNYH PRIRODNYH SORBENTOV DLYa OCHISTKI STOCHNYH VOD [Comparative economic assessment of various natural sorbents for wastewater treatment] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe ob-razovanie. 2020. № 2 (58). S. 65-72.
26. Doronkina I.G., Borisova O.N. EKOLOGO-EKONOMICHESKAYa EFFEKTIVNOST' TEHNOLOGICHESKIH PROCESSOV OCHISTKI STOCHNYH VOD [Ecological and economic efficiency of technological processes of wastewater treatment] // Servis v Rossii i za rubezhom. 2015. T. 9. № 4 (60). S. 112-121.
27. Nekrasova T.P., Kryuchihina A.E. EKONOMICHESKAYa EFFEKTIVNOST' PRIMENENIYa SISTEMY OCHISTKI STOCHNYH VOD [ECONOMIC EFFICIENCY OF THE WASTEWATER TREATMENT SYSTEM APPLICATION] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki. 2012. № 2-1 (144). S. 64-72.
28. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2024624025 Rossijskaya Federaciya. Baza pravil dlya ocenki predpochtitel'nosti vybora ochishchayushchih komponentov fil'trov ballastnyh vod [A rule base for evaluating the preference for the selection of cleaning components of ballast water filters]: № 2024623603 : zayavl. 21.08.2024 : opubl. 10.09.2024 / A. N. Cyguta, A.A. Sorokin, A.E. Plastinin, L.I. Golovackaya; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta"
29. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2024680137 Rossijskaya Federaciya. Nechetkaya produkcionnaya sistema avtomatizirovannogo podbora naibolee predpochtitel'nyh kompo-nentov fil'trov ballastnyh vod [Fuzzy production system for automated selection of the most preferred components of ballast water filters]: № 2024669397 : zayavl. 21.08.2024 : opubl. 26.08.2024 / A. N. Cyguta, A.A. Sorokin, A.E. Plastinin, L.I. Golovackaya; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta"

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Головацкая Леся Ивановна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины», Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6, e-mail: lesy_g@mail.ru

Lesya I. Golovatskaya, Ph.D. (Eng)s, assistant professor, Professor of the Department «Mathematical and natural science disciplines», The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F.M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, st.Nikolskaya, 6, Astrakhan city, 414000, Russian Federation, e-mail: lesy_g@mail.ru

Сорокин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины», Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6, e-mail: alsorokin.kimrt@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Связь», ФГБОУ ВО Астраханский государственный технический университет, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева 16, e-mail: alsorokin.astu@mail.ru

Aleksandr A. Sorokin, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department «Mathematical and natural science disciplines», The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F.M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, st. Nikolskaya, 6, Astrakhan city, 414000, Russian Federation, e-mail: alsorokin.kimrt@mail.ru, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Assistant Professor of the Department of «Communications», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Technical University, 414056, Astrakhan, Tatishchev St. 16, e-mail: alsorokin.astu@mail.ru

Цыгута Анна Николаевна, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: anna.tsyguta@mail.ru

Anna N. Tsyguta, graduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st.Nesterova, 5, e-mail: anna.tsyguta@mail.ru

Пластинин Андрей Евгеньевич, 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

Andrey E. Plastinin, assistant professor, Dr. Sci. (Eng), 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

Отделкин Николай Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Nikolay S. Otdelkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Design Theory of Engineering Cooperation of the Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 09.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 01.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 05.11.2024.

Научная статья

УДК 656.624.3

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.072>

Унифицированная экономико-математическая модель обоснования оптимального количества инфраструктурных объектов воднотранспортного терминала

Карташова О.И.¹ info@astvsuwt.ru, Ничипорук А.О.² nichiporouk@rambler.ru,

Отделкин Н.С.² otdelkin.ns@vsuwt.ru, Федосенко Ю.С.² fds1707@mail.ru

¹Каспийский институт морского и речного транспорта ²Волжский государственный университет
водного транспорта

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения оптимального количества объектов инфраструктуры терминального комплекса на водном транспорте. На основании проведенного анализа научных публикаций и используемых методических подходов сделан вывод о целесообразности формулирования для решения обозначенной задачи экономико-математической модели. Сделаны предложения по составу модели, а также её возможным целевым функциям и ограничениям. В результате сформирована итоговая бикритериальная экономико-математическая модель, сравнивающая капитальные вложения (инвестиции) и эксплуатационные расходы и определяющая их оптимальное соотношение по объектам воднотранспортного терминала. Сделаны выводы о возможности использования предлагаемой модели при оценке возможностей и эффективности создания или модернизации терминалов водного транспорта с целью освоения заданных (прогнозных) грузопотоков в условиях финансовых ограничений и наличия соответствующих ресурсов, а также с учетом привлечения дополнительного оборудования и перегрузочной техники на основе аренды или лизинга.

Ключевые слова: водный транспорт, перегрузка грузов, терминальная инфраструктура, экономико-математическая модель.

Для цитирования: Карташова О.И., Ничипорук А.О., Отделкин Н.С., Федосенко Ю.С. Унифицированная экономико-математическая модель обоснования оптимального количества инфраструктурных объектов воднотранспортного терминала. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 159—167. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.072

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.072>

Unified economic and mathematical model for justifying the optimal number of infrastructure facilities of a water transport terminal

Olga. I. Kartashova¹ info@astvsuwt.ru Andrey O. Nichiporuk² nichiporouk@rambler.ru,

Nikolay S. Otdelkin² otdelkin.ns@vsuwt.ru, Yuri S. Fedosenko² fds1707@mail.ru

¹Caspian Institute of Sea and River Transport, Astrakhan, Russian Federation, ²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem of determining the optimal number of infrastructure facilities of the terminal complex in water transport. Based on the analysis of scientific publications and the methodological approaches used, it was concluded that it is advisable to formulate an economic and mathematical model for solving the specified problem. Suggestions are made on the composition of the model, as well as its possible target functions and limitations. As a result, a final bicriteria economic and mathematical model is formed, which compares capital investments (investments) and operating costs and determines their optimal ratio for water transport terminal facilities. Conclusions were drawn on the possibility of using the proposed model in assessing the possibilities and effectiveness of creating or modernizing water transport terminals in order to develop the specified (forecast) cargo flows in conditions of financial restrictions and the availability of appropriate resources, as well as taking into account the involvement of additional equipment and transshipment equipment on the basis of lease or leasing.

Key words: water transport, cargo handling, terminal infrastructure, economic and mathematical model.

For citation: Andrey O. Nichiporuk, Olga I. Kartashova, Nikolay S. Otdelkin, Yuri S. Fedosenko Unified economic and mathematical model of justification of the optimal number of infrastructure facilities of the water transport terminal. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 159—167. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.072

Введение

Выбор технологии, механизации и организации перегрузочных работ, соответствующего оборудования и перегрузочной техники, оснащения, решение вопросов о строительстве тех или иных инфраструктурных объектов – важные вопросы при

проектировании или модернизации терминального комплекса, особенно такого крупного, как воднотранспортный узел или порт. От правильности и обоснованности принятого решения, а также адекватности сделанного выбора будут зависеть производительность комплекса, качество перегрузочных работ, эффективность работы порта [1].

Учитывая большое многообразие инфраструктурных объектов портового перегрузочного комплекса, решение указанной задачи ручным способом или перебором вариантов представляется весьма сложным, а также не способным дать в итоге оптимальный (наиболее эффективный) результат.

Следует отметить, что для ускорения и упрощения поиска решения подобной задачи может ставиться задача поиска субоптимального (близкого к оптимальному) решения. Если позволяют технические средства и наличие соответствующего программного обеспечения, возможно осуществление полного перебора и оценки всех вариантов. Однако, как показывает практика, последний подход в реальных условиях мало применим из-за слишком значительного многообразия многообразия инфраструктурных объектов и их сочетаний, так как число рассматриваемых вариантов, а с ними и трудоемкость решения, весьма велики.

Субоптимальные методы являются менее трудоемкими и более эффективными при решении больших практических задач. Они не обеспечивают нахождение идеального решения, однако дают хорошие, близкие к оптимальным результаты при невысокой сложности вычислений.

Тем не менее, даже субоптимальные методы, отличаясь большей простотой и эффективностью, по мере увеличения варьируемых элементов и параметров терминалов и транспортно-логистических систем становятся весьма сложны в реализации без дополнительных средств, в качестве которых могут выступать стандартные и специальные информационные технологии.

В связи с этим поиск оптимальных вариантов решения указанной задачи, по нашему мнению, требует создания соответствующего методического аппарата, например, в области инфраструктурного состава грузовых терминальных комплексов.

1. Обзор существующих подходов и направления разработки методики

В учебной и методической литературе, как правило, вопросы оптимизации инфраструктуры терминалов или транспортно-логистических систем затрагиваются весьма поверхностно. Особое внимание уделяется описанию и характеристике их элементов, их взаимодействию между собой, а также с внешней средой (грузоотправителями, грузополучателями и др.). Оптимизационные задачи решаются в рамках соответствующих дисциплин, при этом носят узкопрофильный и ограниченный характер.

Ряд пособий и методических указаний дают общие рекомендации по выбору оптимальных и обоснованию эффективных вариантов компоновки терминала, внедрению прогрессивных технологических и технических решений, а также организационно-экономических мероприятий. При этом конкретика или детальное описание предложений отсутствуют.

В научной литературе и периодических публикациях данные вопросы представляют большой интерес для исследователей и встречаются чаще. Также во многих статьях, помимо обозначения важности и раскрытия значения проблемы поиска

оптимального варианты и повышения эффективности терминальной инфраструктуры, авторы пытаются развить или предложить новые соответствующие методические подходы.

Авторы статьи [2] обращают внимание, что производительность складских перегрузочных машин на контейнерном терминале может зависеть от вместимости склада, параметров штабеля (высоты, числа ярусов), доступности грузовых единиц (мест и глубины размещения контейнеров). С учетом этого производительность перегрузочного оборудования может корректироваться и уточняться потребное на складе количество техники.

Другие структурные элементы терминального комплекса авторами не рассматриваются, как и технико-экономическое обоснование эффективности их использования.

В работе [3] сделан акцент на совершенствовании методических подходов к определению пропускной способности порта и оценке качества обслуживания судов. Обращается внимание на ряд операций, оказывающих влияние на продолжительность грузовой обработки, при этом непосредственно с ней не связанные и невозможные к совмещению. С учетом этого для оценки действительных возможностей терминала по обслуживанию транспортных средств предлагается новый показатель производственной мощности порта – пропускная способность обслуживания.

Кроме пропускной способности и непосредственно обслуживания (обработки) судна другие элементы порта и их характеристики не рассматриваются.

Автор [4] обращает внимание, что в зарубежной практике при технико-экономической оценке проектов морских портов учитываются капитальные вложения и эксплуатационные затраты за весь жизненный цикл проекта. Следует согласиться с данным подходом, так как известно, что при определенных технологических схемах и используемом оборудовании суммарные эксплуатационные расходы (за период эксплуатации портового перегрузочного комплекса) могут значительно превышать капитальные вложения. Может быть и обратная ситуация. В связи с этим традиционный подход, при котором основным экономическим показателем для оценки проекта были капитальные вложения, в настоящее время требует своего уточнения.

При этом, однако, сами авторы в качестве ключевых показателей для технологического проектирования порта (на примере навалочного груза – угля) используют количество причалов и судопогрузочных машин, а выбор оптимального варианта осуществляют на основании производительности перегрузочной техники (основной перегрузочной машины) и коэффициента запаса производительности судопогрузочных операций, что, на наш взгляд, является серьезным упущением и игнорированием результатов зарубежного опыта и собственного анализа.

В [5, 6] предлагается подход к повышению пропускной способности (производительности) портов за счет совершенствования управления и эксплуатации портового хозяйства, планирования работы грузового терминала и смежных видов транспорта. Этот путь, по мнению автора, является

более предпочтительным, так как отличается относительно невысокими затратами и не требует длительного времени реализации (в связи с тем, что происходит оптимизация работы существующих инфраструктурных объектов и оборудования вместо их модернизации и приобретения).

Автором разработана методика определения рейтинговой оценки логистических внутрипортовых цепей по совокупности временного фактора и фактора надежности. Ориентация на существующие технологические схемы грузопереработки и имеющееся в распоряжении портовое оборудование подтверждается использованием для экономической оценки только таких показателей, как затраты на исполнителей перегрузочной операции, себестоимость использования вспомогательной техники, себестоимость использования крана. Таким образом, предлагаемый подход может быть использован для совершенствования деятельности терминала на основе оптимизации эксплуатации погрузочно-разгрузочного оборудования. Однако для случая модернизации или приобретения дополнительной перегрузочной техники, а также других ресурсов и инфраструктурных объектов, он не подходит или требует своей значительной переработки.

Мухиной А.Г. представлена методика определения пропускной способности и производственной мощности контейнерного терминала для имеющегося в распоряжении состава погрузочно-разгрузочного оборудования, избранной технологии перегрузочных работ и складирования [7]. Суточная и месячная пропускные способности определяются для грузового терминала, железнодорожных путей и склада. Также производится оценка ожидаемой выручки (доходов) от производства перегрузочных работ.

Постанов М.Я. предложен метод оценки риска дополнительного (сверхнормативного) простоя судна под грузовыми операциями из-за ограниченной надежности перегрузочных машин [8]. С учетом вероятности выхода перегрузочной техники из строя определяется возможное снижение интенсивности грузовой обработки судна и, соответственно, размер превышения сталийного времени, которое может в результате возникнуть. Авторы работы предлагают страховать ответственность портового оператора, если вероятность несоблюдения нормативных сроков грузовых работ будет слишком велика, а экономические потери больше стоимости страхования. При этом, по нашему мнению, данный подход можно было бы также использовать для обоснования дополнительных резервов перегрузочного оборудования и целесообразности их приобретения на постоянной основе или посредством аутсорсинга.

Авторами [9] производится определение суточной потребности в причальных кранах контейнерного терминала, динамики загрузки склада в зависимости от заданного грузооборота, интенсивности операций автомобильного въездного комплекса, а также распределения судов по причалам для оптимального их обслуживания. При этом основное назначение предлагаемой методики – определение на основе генерации различных сценариев минимальных и максимальных значений исследуемых параметров для последующего нахождения потребного

количества перегрузочного оборудования и распределения имеющихся ресурсов порта.

Вопросы оценки экономической эффективности мероприятий не рассматриваются, вероятно, это связано с тем, что речь о повышении качества использования существующего оборудования и инфраструктуры порта, а не об их модернизации или приобретении новых. Экономические критерии и показатели в методических рекомендациях также не применяются.

Хлебородовым на примере морского контейнерного терминала рассматриваются возможные схемы взаимодействия машин и оборудования [10]. При этом в качестве основных представлены следующие схемы: использование ричстакеров и терминальных тягачей; портальные погрузчики; пневмоколесные козловые краны и терминальные тягачи; рельсовые козловые краны и терминальные тягачи; козловые краны и автоматические транспортные платформы или погрузчики. Как видно, принципиально меняется лишь перегрузочное оборудование внутри терминала. В качестве основной перегрузочной машины выступает контейнерный перегружатель, работающей на выгрузке судна-контейнеровоза. Другие транспортно-технологические схемы (например, ро-ро), а также грузы не рассматриваются.

Приведены преимущества и недостатки обусловленных вариантов взаимодействия машин и оборудования, а также сделаны приблизительные рекомендации по их использованию в зависимости от предполагаемой емкости контейнерного склада. Другие структурные элементы терминала, а также методические рекомендации по определению их рационального соотношения (количества) не рассматриваются.

Наиболее близок к решению сформулированной нами задачи методический подход в статье [11], предлагающей модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирования технологической линии порта.

Рассматривается проблема повышения скорости обслуживания транспортных средств в порту. Следует согласиться с авторами, что данное повышение (по сути, увеличение производительности) может быть достигнуто изменением количества портового перегрузочного оборудования, технологии перегрузочных работ или техническим перевооружением.

Авторы сосредотачивают внимание на выборе портового перегрузочного оборудования (среди различных моделируемых вариантов его использования в рамках альтернативных технологических решений). При этом предлагается использовать такие критерии, как пропускная способность, соответствие технических параметров оборудования грузу и технологии перегрузочных работ. Важным аспектом является выбор между инсорсингом и аутсорсингом перегрузочной техники, а также механизмах их финансового обеспечения (собственные средства, лизинг, кредитование).

Данный подход представляет интерес, однако, по нашему мнению, требует своего расширения на другие элементы перегрузочного комплекса для полноценного обоснования экономически,

технически и технологически эффективного варианта инфраструктуры портового терминала.

2. Требования к разрабатываемой методике

Методика обоснования оптимального состава инфраструктурных объектов воднотранспортного терминала должна отвечать следующим основным требованиям:

1. Являться унифицированной, т.е. подходить для использования применительно к любому грузопотоку и соответствующей технологии перегрузочных работ. Более того, должна обеспечиваться возможность сравнения между собой принципиально разных альтернативных технологических решений и инфраструктурного наполнения терминала, если один и тот же грузопоток может быть освоен с их использованием.

2. Позволять производить обоснование оптимального варианта с учетом экономической эффективности работы терминала, как в текущем периоде, так и за прогнозный период его жизненного цикла.

3. Учитывать дополнительные ограничения, например, по наличию инфраструктурных объектов (перегрузочной техники, подъездных путей, складов и т.п.) и их перегрузочным мощностям, возможности потенциальных инвесторов.

4. Отражать особенности строительства и эксплуатации воднотранспортных терминалов, а также специфику структуры и состава портовой и обеспечивающей инфраструктуры.

$$\sum_{i \in I} K_{\text{общ } i} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (K_{\text{пм } ij} + K_{\text{скл } ij} + K_{\text{пжд } ij} + K_{\text{покр } ij} + K_{\text{наб } ij} + K_{\text{эст } ij} + K_{\text{гидр } ij}) \rightarrow \min,$$

где i – признак груза (грузопотока, причала, на котором он перегружается);

j – признак схемы механизации (технологии перегрузочных работ), по которой перегружается i -ый груз (может отличаться не только самой схемой или технологией, но также характером и количеством используемой перегрузочной техники, оборудования и других ресурсов). При возможности использования однотипной техники, а также перегрузки на одном и том же причале разных родов грузов в модели принимается допущение, что это один и тот же грузопоток;

$K_{\text{общ } i}$ – капитальные вложения (инвестиции) в общестроительные объекты терминала по перегрузке i -го груза, руб.;

$K_{\text{пм } ij}$ – капитальные вложения (инвестиции) в перегрузочные машины и оборудование терминала по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$K_{\text{скл } ij}$ – инвестиции в строительство крытых складов терминала по перегрузке i -го груза по j -ой технологии перегрузочных работ, руб.;

Учитывая значительное разнообразие возможных вариантов организации перегрузочных работ, а также существенный перечень объектов, отличающихся друг от друга по стоимости приобретения и эксплуатации, техническим характеристикам, для поиска оптимального решения по инфраструктурному обеспечению терминала исходя из предполагаемого размера грузопотока и имеющихся в распоряжении ресурсов предпочтительным является формулирование соответствующей экономико-математической модели.

3. Результаты

В качестве первичного критерия, используемого в большинстве обоснований строительства (модернизации) терминальных комплексов, а также иных объектов, как правило, используется размер потребных капитальных вложений (инвестиций) с последующей оценкой их ожидаемой эффективности.

Поскольку определение эффективности можно выполнить по имеющимся стандартным и официально рекомендуемым методикам, сосредоточим внимание на первой части критерия.

Исходя из этого подхода, функция цели в предлагаемой экономико-математической модели – поиск оптимального количества инфраструктурных объектов, при котором будут минимальны капитальные затраты в создание терминала, а также осваиваться заданный (прогнозируемый) грузопоток:

$K_{\text{пжд } ij}$ – инвестиции в строительство подкрановых и железнодорожных путей по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

$K_{\text{покр } ij}$ – инвестиции на покрытие территории причалов по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

$K_{\text{наб } ij}$ – инвестиции на строительство причальной набережной терминала по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

$K_{\text{эст } ij}$ – инвестиции в эстакады терминала по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$K_{\text{гидр } ij}$ – капитальные вложения (инвестиции) дренажную систему, сбрасывающие колодцы, стационарную обваловку склада терминала по перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ (как правило, имеют место при использовании гидромеханизации), руб.

Для корректной работы модели дополнительно вводятся ограничения:

1. Пропускная способность терминала должна соответствовать (превышать) планируемому (прогнозируемому) к освоению грузообороту (расчетно-суточному, навигационному и т.д.):

$$\min[\Pi_{\text{к } ij}; \Pi_{\text{скл } ij}; \Pi_{\text{тыл } ij}; \Pi_{\text{ждк } ij}; \Pi_{\text{ждт } ij}] \geq G_{\text{рс } ij} \text{ для } i \in I; j \in J,$$

где $\Pi_{\text{к } ij}$; $\Pi_{\text{скл } ij}$; $\Pi_{\text{тыл } ij}$; $\Pi_{\text{ждк } ij}$; $\Pi_{\text{ждт } ij}$ – пропускная способность соответственно кордонной (фронтальной) механизации, склада, тыловой механизации, кордонных и тыловых

железнодорожных путей терминала при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, т/сут. (т/нав.);

$G_{рс\ ij}$ – объем планируемого (прогнозируемому) к освоению i -го грузопотока (среднего, расчетного), перегружаемого на терминале по j -ой схеме механизации, т/сут (т/нав.).

Если i -ый груз перегружается на терминале по нескольким схемам механизации (на нескольких причалах), ограничение по пропускной способности может быть записано в укрупненном виде:

$$\sum_j \min[\Pi_{киj}; \Pi_{скл\ ij}; \Pi_{тыл\ ij}; \Pi_{ждк\ ij}; \Pi_{ждт\ ij}] \geq G_{рс\ i} \text{ для } i \in I; j \in J,$$

2. Инвестиционная привлекательность:

$$\sum_i K_{общ\ i} + \sum_i \sum_j (K_{пм\ ij} + K_{скл\ ij} + K_{пжд\ ij} + K_{покр\ ij} + K_{наб\ ij} + K_{эст\ ij} + K_{эидр\ ij}) \leq K_{max} \text{ для } i \in I; j \in J,$$

где K_{max} – максимальный объем инвестиций в строительство или модернизацию терминала, руб.

3. Неотрицательность переменных:

$$K_{общ\ i} \geq 0; K_{пм\ ij} \geq 0; K_{скл\ ij} \geq 0; K_{пжд\ ij} \geq 0; K_{покр\ ij} \geq 0; K_{наб\ ij} \geq 0; K_{эст\ ij} \geq 0; K_{эидр\ ij} \geq 0 \text{ для } i \in I; j \in J.$$

Следует отметить, что при определении стоимости капитальных вложений и пропускной способности по различным элементам терминала необходимо также учитывать возможное наличие существующего оборудования, техники и инфраструктурных объектов (если речь идет о модернизации существующего портового комплекса), которые могут использоваться в рамках j -ой схемы механизации перегрузки i -го груза.

Вторым возможным основным критерием оценки терминалов, в особенности, уже существующих,

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\mathcal{E}_{зп\ ij} + \mathcal{E}_{ам(лиз)\ ij} + \mathcal{E}_{энерг(топл)\ ij} + \mathcal{E}_{рем\ ij} + \mathcal{E}_{аренд\ ij} + \mathcal{E}_{прир\ ij} + \mathcal{E}_{пак\ ij} + \mathcal{E}_{проч\ ij} + \mathcal{E}_{всп\ ij} + \mathcal{E}_{уоп\ ij}) \rightarrow \min,$$

где $\mathcal{E}_{зп\ ij}$ – расходы по оплате труда портовых рабочих при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, а также отчисления на страховые взносы руб.;

$\mathcal{E}_{ам(лиз)\ ij}$ – величина амортизационных отчислений (лизинговых платежей) по инженерным сооружениям и подъемно-транспортным механизмам терминала при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$\mathcal{E}_{энерг(топл)\ ij}$ – расходы на энергоносители, смазочные материалы, малоценные и быстро изнашиваемые предметы при перегрузке i -го груза на терминале по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$\mathcal{E}_{рем\ ij}$ – отчисления в ремонтный фонд по портовым инженерным сооружениям и перегрузочным машинам терминала при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$\mathcal{E}_{аренд\ ij}$ – расходы на аренду перегрузочных машин при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

могут быть эксплуатационные затраты, связанные с использованием существующей инфраструктуры, а также привлечение дополнительной перегрузочной техники и оборудования, в том числе на основе аренды.

Для этого случая и избранного критерия функция цели – поиск оптимального количества инфраструктурных объектов, при котором будут минимальны эксплуатационные расходы по функционированию терминала, а также осваиваться заданный (прогнозируемый) грузопоток.

$\mathcal{E}_{прир\ ij}$ – отчисления на природоохранные мероприятия при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

$\mathcal{E}_{пак\ ij}$ – отчисления на амортизацию и ремонт пакетирующих средств терминала при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации, руб.;

$\mathcal{E}_{проч\ ij}$ – прочие расходы по терминалу при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.;

$\mathcal{E}_{всп\ ij}$ – отчисления на содержание рейдовых и вспомогательных судов терминала при перегрузке i -го груза по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, а также налоги, руб.;

$\mathcal{E}_{уоп\ ij}$ – расходы по управлению и обслуживанию производства при перегрузке i -го груза на терминале по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб.

Ограничения:

1. Пропускная способность терминала должна соответствовать (превышать) планируемому (прогнозируемому) к освоению грузообороту (расчетно-суточному, навигационному и т.д.):

$$\min[\Pi_{киj}; \Pi_{скл\ ij}; \Pi_{тыл\ ij}; \Pi_{ждк\ ij}; \Pi_{ждт\ ij}] \geq G_{рс\ ij} \text{ для } i \in I; j \in J$$

или

$$\sum_j \min[\Pi_{киj}; \Pi_{скл\ ij}; \Pi_{тыл\ ij}; \Pi_{ждк\ ij}; \Pi_{ждт\ ij}] \geq G_{рс\ i} \text{ для } i \in I; j \in J,$$

2. Конкурентоспособность тарифов:

$$d_{ij} \leq d_{\min i} \text{ для } i \in I; j \in J,$$

где d_{ij} – ставка сборов за перегрузку 1 т i -го груза на терминале по j -ой схеме механизации перегрузочных работ, руб/т;

$d_{\min i}$ – минимальная (конкурентная) ставка сборов за перегрузку 1 т i -го груза (принимается на основании данных по другим портовым терминалам и комплексам либо информации о регулируемых тарифах на перегрузочные работы в портах), руб/т.

3. Неотрицательность переменных:

$$\mathcal{E}_{\text{зп}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{ам(лиз)}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{энерг(топл)}} ij \geq 0;$$

$$\mathcal{E}_{\text{рем}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{аренд}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{прир}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{пак}} ij \geq 0;$$

$$\mathcal{E}_{\text{проч}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{всп}} ij \geq 0; \mathcal{E}_{\text{уоп}} ij \geq 0 \text{ для } i \in I; j \in J.$$

Поскольку в большинстве случаев значительные капитальные вложения (инвестиции) в постройку терминала и приобретение оборудования обеспечивают более низкие эксплуатационные расходы по перегрузочному комплексу, и наоборот, целесообразным представляется сравнение капитальных вложений и эксплуатационных расходов за период жизненного цикла терминала (прогнозируемый период эксплуатации или ожидаемый срок окупаемости перегрузочного

комплекса) для выбора наилучшего варианта его инфраструктурного обеспечения.

В этом случае модель примет бикритериальный вид, совместив в себе две представленные ранее функции по минимизации капитальных затрат и эксплуатационных расходов по перегрузочному комплексу (терминалу).

При этом для сравнимости и адекватности выбора эксплуатационные расходы должны считаться за период функционирования комплекса (окупаемости капитальных вложений – при первоначальных расчетах можно принимать 10-20 лет – на основании аналогичных данных по существующим или проектируемым комплексам). Либо, наоборот, капитальные вложения необходимо приводить к одному году (либо периоду, за который определяются эксплуатационные расходы по комплексу).

Дополнительно составляющие обеих функций возможно рассчитывать с использованием дисконтирования. Однако на первичном этапе разработки и апробации модели считаем это нецелесообразным, поскольку это значительно усложняет расчеты и поиск оптимального решения.

Таким образом получим, что результирующая функция цели – поиск оптимального количества инфраструктурных объектов, при котором будут минимальны капитальные затраты и эксплуатационные расходы по функционированию терминала, а также осваиваться заданный (прогнозируемый) грузопоток:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} K_{\text{общ}} i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (K_{\text{пм}} ij + K_{\text{скл}} ij + K_{\text{пжд}} ij + K_{\text{покр}} ij + K_{\text{наб}} ij + K_{\text{эст}} ij + K_{\text{гидр}} ij) \rightarrow \min; \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\mathcal{E}_{\text{зп}} ij + \mathcal{E}_{\text{ам(лиз)}} ij + \mathcal{E}_{\text{энерг(топл)}} ij + \mathcal{E}_{\text{рем}} ij + \mathcal{E}_{\text{аренд}} ij + \\ & + \mathcal{E}_{\text{прир}} ij + \mathcal{E}_{\text{пак}} ij + \mathcal{E}_{\text{проч}} ij + \mathcal{E}_{\text{всп}} ij + \mathcal{E}_{\text{уоп}} ij) T_{\text{ок}} \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где $T_{\text{ок}}$ – период жизненного цикла терминала (прогнозируемый период эксплуатации или ожидаемый срок окупаемости перегрузочного комплекса), годы.

В дополнение к предыдущим сформулированным ограничениям могут быть учтены сезонные и иные колебания в объемах обслуживаемого грузопотока, возможность аренды техники и оборудования, привлечения сторонних организаций на периоды этих изменений (а не только для осваивания постоянной составляющей грузопотока). Вариантом подобного нового ограничения может стать выражение, где пропускная способность и количество постоянных ресурсов будет находиться в пределах между пессимистичным и оптимистичным прогнозными значениями (соответственно между минимальным возможным размером грузопотока и максимальным). Также важным ограничением при имеющихся данных может быть максимально

возможное число арендуемых ресурсов или минимально необходимое на постоянной основе.

Закключение

Сформулированная авторами экономико-математическая модель может быть использована для обоснования оптимального состава инфраструктуры воднотранспортных перегрузочных комплексов. Отличительной особенностью предлагаемой модели является возможность нахождения наилучшего соотношения между инвестиционной и эксплуатационной составляющей (между капитальными вложениями и эксплуатационными затратами), а также учет вариантов развития существующих терминалов и использования имеющихся в наличии ресурсов, что соответствует современному уровню развития внутреннего водного транспорта, задачам модернизации его инфраструктуры и повышения конкурентоспособности [12-16].

Литература

1. Обеспечение качества и эффективности перевозок сухих грузов речным транспортом в современных условиях : монография. Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. 132 с.
2. Кузнецов А.Л., Семенов А.Д., Левченко В.П. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
3. Минеев С.К. Влияние организации обслуживания судов на пропускную способность портов. Журнал университета водных коммуникаций. 2013. №3. С. 147–152.
4. Купцов Н.В. Разработка методики расчета оптимальной производительности морского грузового фронта для терминалов по экспортной перевалке угля на ранних стадиях проектирования. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 925–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-925-940.
5. Стрельников Д.Д. Рейтинговая оценка логистических внутривпортовых цепей и коэффициент производительности портовых логистических операций. Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2016. №3. С. 99–106.
6. Стрельников Д.Д. Рейтинговая оценка терминальных логистических цепей. Вестник ВГАВТ. 2017. №52. С. 15–20.
7. Мухина А.Г. Методика планирования производственной мощности портового контейнерного терминала в транспортно-логистической системе. Журнал университета водных коммуникаций. 2010. №4. С. 161–167.
8. Постан М.Я. Разработка метода оценки риска дополнительного простоя судна под грузовыми операциями из-за ограниченной надежности перегрузочных машин. Технологический аудит и резервы производства. 2014. №5/2(19). С. 69–75. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.26740.
9. Агеев А.П., Кузнецов А.Л. Динамический расчет технологических параметров контейнерного терминала методом генерации сценариев. Транспортное дело России. 2010. №2. С. 122–127.
10. Хлебодоров В.С. Анализ эффективности существующих систем организации контейнерных терминалов при использовании различного транспортно-грузового оборудования. Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. №1. С. 238–251.
11. Зуб И.В., Ежов Ю.Е., Стенин Н.Н. Модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирования технологической линии порта. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 6. С. 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.
12. Домнина О.Л., Костров В.Н., Ничипорук А.О. Современное состояние, проблемы и основные направления развития транспортной логистики на водном транспорте. Научные проблемы водного транспорта. 2023. №76. С. 141-165. DOI: 10.37890/jwt.vi76.368
13. Карташова О.И. Современное состояние и направления развития научно-методического обеспечения региональных грузовых перевозок с участием водного транспорта. Научные проблемы водного транспорта. 2022. №73. С. 185-195. DOI: 10.37890/jwt.vi73.293
14. Кузьмичев И.К., Малышкин А.Г., Уртминцев Ю.Н., Домнина О.Л. Совершенствование научно-методической базы системы организации перевозок грузов на внутреннем водном транспорте. Морские интеллектуальные технологии. 2021. №3. Часть 1. С. 135–141. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.015
15. Нюркин С.И., Нюркина Э.Е. Поиск путей совершенствования работы судоходных предприятий в регионах с развитой транспортной инфраструктурой. Научные проблемы водного транспорта. 2024. №79. С. 157–163. DOI: 10.37890/jwt.v79.480
16. Тюленев К.Г. Совершенствование транспортно-технологических схем мультимодальных перевозок на основе водного транспорта при реализации стратегических целей транспортного комплекса. Морские интеллектуальные технологии. 2022. №3. Часть 1. С. 296–301. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.038

References

1. Obespechenie kachestva i effektivnosti perevozok sukhikh грузов rechnym transportom v sovremennykh usloviyakh : monografiya [Ensuring the quality and efficiency of dry cargo transportation by river transport in modern conditions: monograph]. N.Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. 132 s.
2. Kuznetsov A.L., Semenov A.D., Levchenko V.P. Vliyaniye tekhnicheskikh ogranicheniy peregruzochnogo oborudovaniya na proizvoditel'nost' operatsiy [The impact of technical limitations of transshipment equipment on the performance of operations]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2019. T. 11. № 3. S. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
3. Mineev S.K. Vliyaniye organizatsii obsluzhivaniya sudov na propusknyuyu sposobnost' portov [Impact of ship service organization on port capacity]. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. 2013. №3. S. 147–152.
4. Kuptsov N.V. Razrabotka metodiki rascheta optimal'noy proizvoditel'nosti morskogo gruzovogo fronta dlya terminalov po eksportnoy perevalke uglya na rannikh stadiyakh proektirovaniya [Development of a methodology for calculating the optimal productivity of the sea cargo front for coal export transshipment terminals at the early stages of design]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2017. T. 9. № 5. S. 925–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-925-940.
5. Strel'nikov D.D. Reytingovaya otsenka logisticheskikh vnutriportovykh tsepey i koeffitsient proizvoditel'nosti portovykh logisticheskikh operatsiy [Rating assessment of logistics intra-port chains and productivity ratio of port logistics operations]. Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2016. №3. S. 99–106.

6. Strel'nikov D.D. Reytingovaya otsenka terminal'nykh logisticheskikh tsepey [Rating assessment of terminal logistics chains]. Vestnik VGAVT. 2017. №52. S. 15–20.
7. Mukhina A.G. Metodika planirovaniya proizvodstvennoy moshchnosti portovogo konteynernogo terminala v transportno-logisticheskoy sisteme [Methodology for planning the production capacity of the port container terminal in the transport and logistics system]. Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. 2010. №4. S. 161–167.
8. Postan M.Ya. Razrabotka metoda otsenki riska dopolnitel'nogo prostoya sudna pod gruzovymi operatsiyami iz-za ogranichennoy nadezhnosti peregruzochnykh mashin [Development of a method for assessing the risk of additional vessel downtime under cargo operations due to limited reliability of transshipment machines]. Tekhnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva. 2014. №5/2(19). S. 69–75. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.26740.
9. Ageev A.P., Kuznetsov A.L. Dinamicheskiy raschet tekhnologicheskikh parametrov konteynernogo terminala metodom generatsii stszenariy [Dynamic calculation of container terminal process parameters by scenario generation method]. Transportnoe delo Rossii. 2010. №2. S. 122–127.
10. Khleborodov V.S. Analiz effektivnosti sushchestvuyushchikh sistem organizatsii konteynernykh terminalov pri ispol'zovanii razlichnogo transportno-gruzovogo oborudovaniya [Analysis of the efficiency of existing systems for organizing container terminals using various transport and cargo equipment]. Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii. 2012. №1. S. 238–251.
11. Zub I.V., Ezhov Yu.E., Stenin N.N. Model' vybora portovogo peregruzochnogo oborudovaniya na osnove modelirovaniya tekhnologicheskoy linii porta [Port transshipment equipment selection model based on port process line simulation]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2020. T. 12. № 6. S. 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.
12. Domnina O.L., Kostrov V.N., Nichiporuk A.O. Sovremennoe sostoyanie, problemy i osnovnye napravleniya razvitiya transportnoy logistiki na vodnom transporte [Current state, problems and main directions of development of transport logistics in water transport]. Russian Journal of Water Transport. 2023. №76. S. 141-165. DOI: 10.37890/jwt.vi76.368
13. Kartashova O.I. Sovremennoe sostoyanie i napravleniya razvitiya nauchno-metodicheskogo obespecheniya regional'nykh gruzovykh perevozok s uchastiem vodnogo transporta [The current state and directions of development of scientific and methodological support for regional freight transportation with the participation of water transport]. Russian Journal of Water Transport. 2022. №73. S. 185-195. DOI: 10.37890/jwt.vi73.293
14. Kuz'michev I.K., Malyshkin A.G., Urtmintsev Yu.N., Domnina O.L. Sovershenstvovanie nauchno-metodicheskoy bazy sistemy organizatsii perevozok gruzov na vnutrennem vodnom transporte [Improving the scientific and methodological base of the system for organizing the transportation of goods in inland water transport]. Marine intellectual technologies. 2021. №3. Part 1. P. 135–141. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.015
15. Nyurkin S.I., Nyurkina E.E. Poisk putey sovershenstvovaniya raboty sudokhodnykh predpriyatiy v regionakh s razvitoй transportnoy infrastrukturой [Search for ways to improve the work of shipping enterprises in regions with a developed transport infrastructure]. Russian Journal of Water Transport. 2024. №79. S. 157–163. DOI: 10.37890/jwt.v79.480
16. Tulenev K.G. Sovershenstvovanie transportno-tekhnologicheskikh skhem mul'timodal'nykh perevozok na osnove vodnogo transporta pri realizatsii strategicheskikh tseley transportnogo kompleksa [Improving transport and technological schemes of multimodal transportation based on water transport in the implementation of the strategic goals of the transport complex]. Marine intellectual technologies. 2022. №3. Part 1. P. 296–301. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.038

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Карташова Ольга Ивановна, доктор экономических наук, доцент, директор, Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М.Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, 6 e-mail: info@astvsuwt.ru

Olga I. Kartashova, Dr. Sci. (Econ), Assistant Professor, Director, The Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of the Volga State University of Water Transport, st. Nikolskaya, 6, Astrakhan city, 414000, Russian Federation e-mail: info@astvsuwt.ru

Ничипорук Андрей Олегович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры логистики и маркетинга, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nichiporouk@rambler.ru

Andrey O. Nichiporuk, Dr. Sci. (Eng), Assistant Professor, Professor of the Department of Logistics and Marketing, Volga State University of Water Transport, Nesterova, 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: nichiporouk@rambler.ru

Отделкин Николай Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории конструирования инженерных сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Nikolay S. Otdelkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Design Theory of Engineering Cooperation of the Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: otdelkin.ns@vsuwt.ru

Федосенко Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем информационной безопасности управления и телекоммуникаций, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Yuri S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Security Systems Management and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 13.11.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 19.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 23.11.2024.

Научная статья

УДК 656.61.052 / 004.021

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.073>

Разработка и исследование системы эффективного маневрирования судна курсом для расхождения с судном-целью на основании оптимизационного подхода

Филатов В.И.¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, Астреин В.В.¹ Astrein-vadim@rambler.ru,
Боран-Кешишьян А.Л.¹ bk.anastas@gmail.com, Михеева Т.А.² MiheevaTA@yandex.ru,
Федосенко Ю.С.² fds1707@mail.ru

¹Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова,

²Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. Данная статья является продолжением ряда исследований [1, 2, 3, 12, 13] по разработке системы поддержки принятия решений безопасности судовождения – СППР. В предлагаемом исследовании рассматривается вопрос выработки траектории движения судна, обеспечивающей безопасность судовождения с учётом ограничений, накладываемых на область маневрирования. Объектом управления является морское судно. Задачей судна является следование между последовательно-заданными координатами по линиям заданного пути (ЛЗП). Средой, в которой судну необходимо следовать составляют статические и динамические объекты, которые оказывают влияние на безопасность судна. В статье рассматривается метод выработки манёвра для расхождения с судном-целью таким образом, чтоб обеспечить безопасность судна. Разработан алгоритм, позволяющий реализовать метод для автоматического расчёта безопасного курса, который основан на синтезе численных методов, теории графов, математическом моделировании, методов численной оптимизации. Результатом работы алгоритма является модифицированная траектория расхождения с судном-целью, обеспечивающее расхождение на безопасном расстоянии.

Ключевые слова: Безэкипажное судно, МАНС, оптимизация, оптимальное решение, оптимизация одномерной функции, автоматическое расхождение с судном, система поддержки принятия решений, безопасность мореплавания.

Для цитирования: Филатов В.И., Астреин В.В., Боран-Кешишьян А.Л., Михеева Т.А., Федосенко Ю.С. Разработка и исследование системы эффективного маневрирования судна курсом для расхождения с судном-целью на основании оптимизационного подхода. Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 4 часть 2, С. 168—175. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.073

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.66.4.073>

Effective Ship's maneuvering system to avoid collision with Target-tracked Ship based on Optimization methodology. Development and Assessment

Viktor I. Filatov¹ Filatov_viktor1994@mail.ru, Vadim V. Astrein² Astrein-vadim@rambler.ru,
Anastas L. Boran-Keshishyan¹ bk.anastas@gmail.com, Tatiana A. Mikheeva² MiheevaTA@yandex.ru,
Yuri S. Fedosenko² fds1707@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation

²Volga State University of Water Transport

Abstract. This article is the continuation of cycle researches [1, 2, 3, 12, 13] dedicated to develop marine Ship's Decision Support System of Navigational Safety – DSS. The Subject of generation Ship's preliminary navigation trajectory that manages navigational safety taking into account restrictions and obstructions that exist in navigational area described in this article. The controlled object in this system is marine Vessel. The main challenge of the Vessel is Proceeding between sequentially-ordered positions with its coordinates through Voyage Plan Courses (VPC). External area, where the Ship should navigate consists of static and dynamic objects that may have influence on Safety of Navigation. In the research highlighted method of maneuver generation for collision avoidance with other target-tracked vessels (TT) such way to manage Safety of Navigation. The Algorithm developed that could solve above-mentioned Task for automatic calculation of Safety maneuver, that based on mathematical methods and includes numerical methods, graph theory, mathematical modelling, methods of numerical optimization. The results of Algorithm performance are modified Trajectory to avoid collision or close-quarter situation with vessel-target or obstruction in a safety distance off.

Keywords: Unmanned Vessel, MANS, optimization, optimal solution, single-variable function optimization, automatic collision-avoidance with target-vessel, decision support system, navigational safety.

For citation: Viktor I. Filatov, Vadim V. Astrein, Anastas L. Boran-Keshishyan, Alexey V. Soloviev, Yuri S. Fedosenko Effective Ship's maneuvering system to avoid collision with Target-tracked Ship based on Optimization methodology. Development and Assessment. Marine intellectual technologies. 2024. № 4 part 2, P. 168—175. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.073

Введение

Вектор технического развития робототехнических комплексов (РТК) в морской индустрии, отражается в разработке полностью автономного судна (морского автономного надводного судна - МАНС). Одним из аспектов МАНС является разработка полноценной системы поддержки принятия решений безопасности судоходства - СППР. Согласно «Положению по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)», утвержденному Российским морским регистром судоходства (НД № 2-030101-037), вступившему в силу 01.08.2020 г. [8] такая система, в том числе, постоянно ведет мониторинг и контроль трех основных систем, используемых для управления МАНС:

- системы распознавания целевой обстановки и определения положения собственного судна с возможностями их отображения;
- системы прогнозирования и безопасного расхождения судов в соответствии с МППСС-72 и хорошей морской практикой;
- системой управления движением и маневрированием [3, 8].

Разработка таких систем нашла отражение в работах отечественных исследователей [1,2,3,10,11] и других публикациях. Также есть разработки, в которых похожие задачи формализуются и решаются для смежных транспортно-логистических задач [6].

В статье приведен метод выбора безопасного манёвра для расхождения судов в море. В ситуации расхождения участвуют два судна: собственное судно – судно, являющееся объектом управления и судно-цель, являющееся элементом динамической среды. Методом управления является изменение курса судна в соответствии с МППСС-72 и хорошей морской практикой.

Введём постоянные величины глобальной задачи безопасного плавания судна, которая решается с помощью подготовки плана перехода $P_{ГЕН}$ – совокупности последовательных путевых точек, и образованных ими линий заданного пути (ЛЗП):

$$P_{ГЕН} = \{(p_i, p_{i+1}) | p_i = (\xi_i, \eta_i), p_{i+1} = (\xi_{i+1}, \eta_{i+1})\}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, k.$$

где: p_i – начальная путевая точка со своими прямоугольными координатами (ξ_i, η_i) в неподвижной системе отсчёта, связанной с землёй, p_{i+1} – очередная путевая точка, являющаяся целевой.

В настоящее время на судах планирование перехода осуществляется вручную компетентным специалистом с учётом всех ограничений и условий, влияющих на безопасность мореплавания. Существуют методы автоматической выработки ЛЗП, рассмотренные в публикациях [12, 13] и др.

Ограничением глобальной задачи безопасности плавания судна являются области "No Go Area" – NGA. Совокупность объектов, представленных полигонами, нахождение судна в которых запрещено из различных соображений безопасности, оптимальности, эффективности и т.д.

$$P_{NGA} =$$

$$= \{[p_{NGA_j}, \dots, p_{NGA_n}] | p_{NGA_n} = (\xi_{NGA_n}, \eta_{NGA_n})\}, \quad (2)$$

$$j = 1, \dots, n.$$

p_{NGA_n} – множество материальных точек с координатами $(\xi_{NGA_n}, \eta_{NGA_n})$ в неподвижной системе отсчёта, связанной с землёй, являющиеся характерными точками вершин полигонов NGA.

Данные ограничения являются статическими и не меняются в процессе плавания судна, что делает их учёт возможным на этапе первичного построения ЛЗП.

Под локальной задачей безопасного плавания судна, в статье, понимается следование судна по безопасному пути, настолько близкому к $P_{ГЕН}$, насколько позволяют условия плавания и ограничения среды. Под средой понимаются статические и динамические опасности. Динамические опасности представлены множеством судов. Определением наличия опасности столкновения с группой судов-целей происходит в системе автоматического мониторинга и контроля (САМК) безопасности судоходства рассмотрено в исследовании [3], также выбирается судно-цель, с которой в первую очередь необходимо разойтись.

Решением локальной задачи безопасности плавания судна при расхождении с встречным судном-целью является последовательность траекторий – манёвром курсом собственного судна, позволяющий безопасно разойтись с судном-целью, а затем изменить курс в очередную путевую точку p_{i+1} . Под встречным судном-целью, в данной статье, понимается судно с следующими характеристиками:

- Судно-цель сближается с собственным судном;
- Судно-цель подходит к собственному судну с любого направления впереди траверза или на траверзе собственного судна т.е. подходит с носового курсового угла;
- САМК определено, что элементы движения судна-цели являются постоянными и судно движется на установившемся курсе, методы такого расчёта рассмотрены в [14];
- У судна-цели нет преимущества перед собственным судном на основании взаимных обязанностей судов и правил плавания и маневрирования, изложенных в МППСС-72.

Формулировка заданной структуры системы автоматического маневрирования

В данном исследовании приведены методы, которые позволяют выработать судну эффективный манёвр для расхождения с опасным судном-целью с учётом ограничений, накладываемых на манёвр.

Наличие ограничений существенным образом усложняет задачу поиска экстремума [4, 5, 7]. Их учёт, в рамках данного исследования, состоит из следующих этапов:

- Определение оптимизируемого критерия качества управления – целевой функции;
- Выявление физических ограничений, накладываемых на манёвр судна;
- Преобразование физических ограничений в математические функции;

- Сведение задачи с оптимизации с ограничениями к задаче поиска безусловного экстремума;
- Модификация целевой функции методом замены переменной.
- Оптимизация целевой функции с помощью соответствующего метода.

Введение начальных постоянных

Начальные постоянные величины, необходимые для инициализации алгоритма автоматического расчёта безопасного манёвра включают в себя элементы движения собственного судна и элементы движения судов-целей:

$p_0 = (\xi_0, \eta_0)$ – местоположение собственного судна в момент времени начала вычисления элементов движения множества судов-целей;

K_0, v_0 – курс и скорость собственного судна в момент времени начала вычисления элементов движения множества судов-целей.

P_{TT} – местоположение множества судов-целей в момент времени начала расчёта элементов движения множества судов-целей.

$$P_{TT} = \{p_{ttl}, \dots, p_{tt\bar{n}} \mid p_{ttl} = (\xi_{ttl}, \eta_{ttl})\}, l = 1, \dots, \bar{n} \quad (3)$$

K_{TT}, V_{TT} – курс и скорость множества судов-целей в момент времени начала расчёта элементов движения множества судов-целей.

Введение функций-операторов

Под функцией-оператором понимается арифметическое или логическое преобразование входных данных. Операторы используются для сокращения математических выкладок [7].

Функция-оператор локсодромического расстояния между заданными материальными точками.

$$D(p_i, p_{i+1}) = \|(\xi_i, \eta_i), (\xi_{i+1}, \eta_{i+1})\| = \sqrt{(\eta_{i+1} - \eta_i)^2 + (\xi_{i+1} - \xi_i)^2} \quad (4)$$

Является эквивалентным выражению: «вычислить локсодромическое расстояние между материальными точками p_i и p_{i+1} со своими географическими координатами».

Функция-оператор направления между заданными материальными точками.

$$\Pi(p_i, p_{i+1}) = \arctg\left(\frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\xi_{i+1} - \xi_i}\right) \quad (5)$$

где: $\Pi(p_i, p_{i+1}) \in [0, 360^\circ]$. Является эквивалентным выражению: «вычислить направление из материальной точки p_i в материальную точку p_{i+1} со своими географическими координатами и привести полученное значение в круговую систему отсчёта с помощью анализатора четверти».

Введение контролируемых переменных

К контролируемым переменным относятся динамические величины – временные функции, характеризующие положения и перемещения собственного судна и судов-целей, а также взаимное расположение судов-целей относительно собственного судна.

Первой величиной является временной вектор

$$\mathbf{t} = [t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{\max}] \quad (6)$$

где: t_0 – заданный параметр нижней границы временного интервала вычисления элементов движения судов-целей, $t_{\max}$ – заданный параметр, характеризующий верхнюю границу временного интервала вычисления элементов движения множества судов-целей.

Временная функция местоположения судов-целей:

$$p_{TT}(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \xi_{TT}(\mathbf{t}) = \xi_0 + \mathbf{t}(V_{TT} \cos K_{TT}); \\ \eta_{TT}(\mathbf{t}) = \eta_0 + \mathbf{t}(V_{TT} \sin K_{TT}). \end{bmatrix} \quad (7)$$

Аналогичная временная функция местоположения собственного судна: $p(\mathbf{t}) = (\xi(\mathbf{t}), \eta(\mathbf{t}))$, где:

$$p(\mathbf{t}) = p_0 + f(K_0, \mathbf{t}) \quad (8)$$

Важнейшим показателем безопасности при маневрировании судов является дистанция кратчайшего сближения $D_{кр}$ – строгая, с точки зрения математики формула, отражающая зависимость между дистанцией кратчайшего сближения и двумя парами координат «пеленг-дистанция» встречного судна, являющиеся графическим отображением относительной прокладки [14]. Предлагается представить её в виде функции-оператора:

$$D_{кр}(p(\mathbf{t}), p_{TT}(\mathbf{t})) = \frac{|D_1 D_2 \sin(\Pi_1 - \Pi_2)|}{\sqrt{D_1^2 - 2D_1 D_2 \cos(\Pi_1 - \Pi_2) + D_2^2}}; \quad (9)$$

$$D_1 = D(p(\mathbf{t}), p_{TT}(\mathbf{t})), \Pi_1 = \Pi(p(\mathbf{t}), p_{TT}(\mathbf{t}));$$

$$D_2 = D(p(\mathbf{t} + 1), p_{TT}(\mathbf{t} + 1));$$

$$\Pi_2 = \Pi(p(\mathbf{t} + 1), p_{TT}(\mathbf{t} + 1)).$$

Использование этого оператора является эквивалентным запросу: «вычислить дистанцию кратчайшего сближения $D_{кр}$ между собственным судном и судном-целью». Следует отметить, что значение $D_{кр}$ является постоянной величиной неизменной во времени, если элементы движения собственного судна и судна-цели являются константами.

Таким образом, имея начальные постоянные и функции-операторы, получены контролируемые переменные – временные ряды. Можно сформировать навигационную обстановку, которая представлена на рисунке 1.1, 1.2.

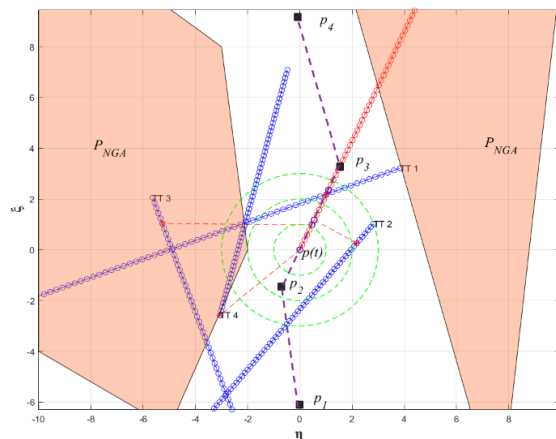


Рис. 1.1 Модель навигационной обстановки, где красный вектор – собственное судно, ТТ – синий вектор-множество судов-целей, $\{p_1 - p_4\}$ последовательность ЛЗП между путевыми точками, NGA – полигоны запрета плавания.

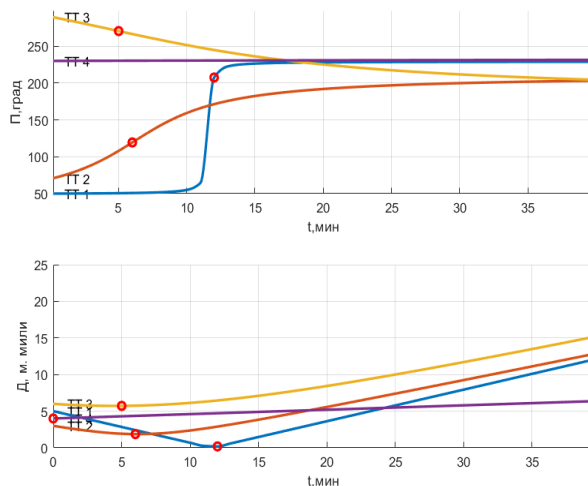


Рис. 1.2 Сплошные линии – временные ряды $\Pi(t)$, $D(t)$, красные точки расположены в координатах $(T_{кр}, D_{кр})$ на нижнем графике. $T_{кр}$ – момент кратчайшего сближения с судами-целями. На верхнем графике $f(T_{кр}) \rightarrow P_{кр}$, где $P_{кр}$ – пеленг в момент кратчайшего сближения с судами-целями.

Формирование целевой функции и ограничений

Задание множества исходов

На данном этапе необходимо сформировать область определения целевой функции. Поскольку безопасность собственного судно обеспечивает методом маневрирования курсом, то задаётся интервал курсов:

$$\Delta K_{\max} = X\alpha; \quad (10)$$

$$K_{\max} = K_0 + \Delta K_{\max}. \quad (11)$$

где: $\Delta K_{\max}$ – верхняя граница предельного приращение курса, зависящая от пространства признаков – X , которые в различных ситуациях являются ключевыми для определения максимального отворота, α – набора коэффициентов значимости для соответствующей характеристики,

$K_{\max}$ – числовое значение величины максимального изменения курса.

Тогда вектор-интервал возможных курсов соответствует множеству целых неотрицательных чисел, также очевидно, что оно определяется на интервале $[0, 360]$.

$$\hat{K} = [K_0, K_m, \dots, K_{\max}] =$$

$$= \{K_m \in \mathbb{Z} \wedge K_m \geq 0 \mid K_0 \leq K_m \leq K_{\max}\} \quad (12)$$

Поскольку формируется множество альтернатив, необходимо задать для них вектор-функцию времени, которая соответствует временному интервалу между моментом выполнения изменения курса $\tilde{t}$ и τ_3 – заданной величиной верхней границы временного интервала анализа навигационной обстановки, куда входят расчёты элементов движения судов-целей после манёвра, а также анализ статических навигационных опасностей NGA.

$$\tau = \{\tilde{t}, \dots, \tau_i, \dots, \tau_3\} \quad (13)$$

Выполняется расчёт местоположения судна на временном интервале τ на всём множестве $\hat{K}$:

$$p(\tau) = p_0(\tilde{t}) + f(\hat{K}, \tau) \quad (14)$$

Вычисляются элементы расположения судов-целей относительно собственного судна на временном интервале τ на всём множестве $\hat{K}$:

$$\hat{D} = D(p(\tau), p_{TT}(\tau)), \hat{\Pi} = \Pi(p(\tau), p_{TT}(\tau)) \quad (15)$$

Задание целевой функции

Основой для оптимизируемой целевой функции послужит $\hat{D}_{кр}$ – вектор полного диапазона возможных кратчайших расстояний:

$$\hat{D}_{кр}(\hat{K}, \tau) = D_{кр}(p(\tau), p_{TT}(\tau)) \quad (16)$$

На рисунке показана функция $\hat{D}_{кр}(\hat{K}, \tau)$, как функция, зависящая от $\hat{\Pi}$ и $\hat{D}$, рассчитанных для предвычисленного момента изменения курса $\tilde{t}$.

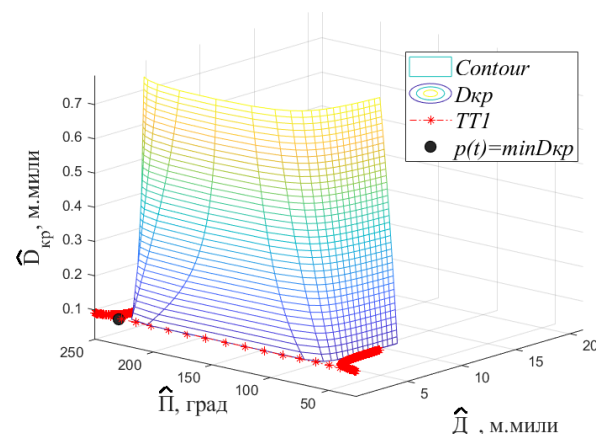


Рис. 2. Функция $\hat{D}_{кр}$, связывающая собственное значение с парой расчётных величин «пеленг-дистанция» в момент $\tilde{t}$. Чёрный маркер – установлен в координаты $(\Pi_{кр}, D_{кр})$ в момент $T_{кр}$, что соответствует судну-цели ТТ1 на рис 1.2

Задание ограничений

Первое ограничение – на манёвр изменения курса, накладываемое в связи с изменением $K(\tau)$ в направлении достижимости полигона опасностей P_{NGA} . Оно является вектор-функцией столбцом $G(p(\tau)) = [g_1, g_2, \dots, g_k]$ с размерность k , совпадающей с размерностью τ . Под проверкой принадлежности точки полигону подразумевается алгоритм локализации точки на выпуклом многоугольнике, и рассмотрен в [9].

Областью определения является материальная точка p в дискретный момент времени τ . Каждому элементу из $p(\tau)$ ставится в соответствие значение из области $[0 \vee 1]$, как результата проверки на истинность следующих условий:

$$G(p(\tau)) = \begin{cases} \ll \text{если } p(\tau) \text{ лежит в области } P_{NGA} \gg \rightarrow \\ \rightarrow g(p(\tau)) = [0]; \\ \ll \text{если } p(\tau) \text{ не лежит в области } P_{NGA} \gg \rightarrow \\ \rightarrow g(p(\tau)) = [1]. \end{cases} \quad (17)$$

Следующим действием является ограничение на манёвр $\hat{K}$ на основании введения функции $\bar{G}(\hat{K})$ проверки на истинность следующих условий:

$$\bar{G}(\hat{K}, G(p(\tau))) = \begin{cases} \ll \text{если } \exists g(p(\tau), \hat{K}) = [0] \gg \rightarrow \\ \rightarrow \bar{G}(\hat{K}) = [0]; \\ \ll \text{если } \exists g(p(\tau), \hat{K}) = [1] \gg \rightarrow \\ \rightarrow \bar{G}(\hat{K}) = [1]. \end{cases} \quad (18)$$

Данная операция осуществляет переход от ограничения материальной точки местоположения судна в момент времени $p(\tau)$ (Рисунок 3.1) на весь манёвр в конкретном направлении (Рисунок 3.2).

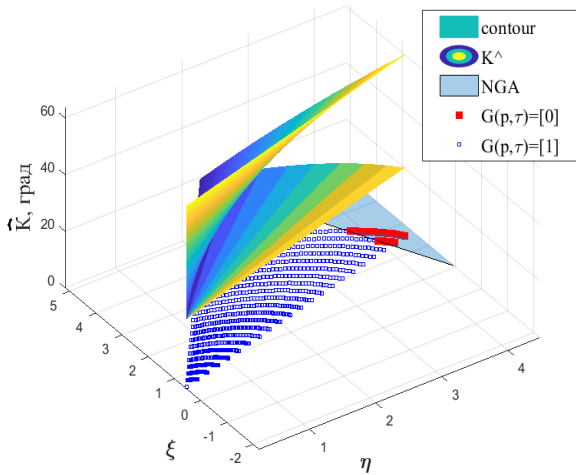


Рис. 3.1 Проверка условий (17) и построение функции-модификатора $G(p(\tau))$.

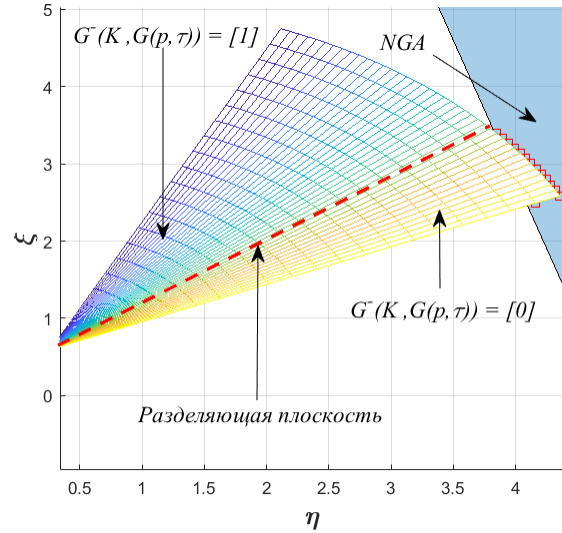


Рис. 3.2 Проверка условий (18) и построение функции-модификатора $\bar{G}(\hat{K}, G(p(\tau)))$.

Другое ограничение накладывается на достижимость значения целевой функции $f: \hat{K} \rightarrow \hat{D}_{кр}$ порогового значения $d_{доп}$ на отрезке с граничными точками $[K_0, K_{max}]$. Для этого формируется вектор-столбец $H(\hat{K}) = [h_1, h_2, \dots, h_k]$, где размерность k , совпадающей с размерностью τ . Каждому элементу из $\hat{K}$ ставится в соответствие значение из области $[0 \vee 1]$, как результата проверки на истинность условий:

$$H(\hat{K}) = \begin{cases} \ll \text{если } \hat{D}_{кр}(\hat{K}) > d_{доп} \gg \rightarrow h(\hat{K}) = [0]; \\ \ll \text{если } \hat{D}_{кр}(\hat{K}) \leq d_{доп} \gg \rightarrow h(\hat{K}) = [1]. \end{cases} \quad (19)$$

где: $d_{доп}$ – заданное числовое значение допустимой дистанции расхождения – нижнего порогового значения параметра безопасного расхождения с судном-целью.

Во многих навигационных ситуациях чрезмерного сближения с судном-целью, когда опасность столкновения существует, стоит задача расхождения с судном-целью на безопасном расстоянии $d_{доп}$.

Таким образом на начальном этапе можно взять функцию $\hat{D}_{кр}(\hat{K}, \tau)$ и модифицировать её с помощью замены переменных. Такой метод состоит в сведении задачи оптимизации с условиями к задаче безусловной оптимизации [4, 5].

Формализуем критерий качества управления судном с помощью манёвра курсом – оптимизируемую целевую функцию:

$$\Phi(\hat{K}, \bar{G}, H) = \hat{D}_{кр}(\hat{K}, \tau) \cdot \bar{G}(\hat{K}, G(p(\tau))) \cdot H(\hat{K}) \quad (20)$$

Рассматриваемая в исследовании задача в рамках оптимизационного подхода следующим образом:

$$\max \Phi(\hat{K}, \bar{G}, H) \quad (21)$$

Оптимизация одномерной целевой функции методом золотого сечения

В данном разделе кратко приведены основные шаги итерационного алгоритма золотого сечения в задачи эффективного маневрирования судна с помощью собственного курса, полное теоретическое описание данного метода представлено в [5].

УСЛОВИЕ: В данном случае предлагается обратиться к методам нулевого порядка [4]. Поскольку функция унимодальная, то подойдет алгоритм золотого сечения. На начальном этапе задаётся интервал локализации. Пусть $[K_0, K_{max}] \equiv [a_1, b_1] = [a, b]$, и длина конечного интервала локализации $\varepsilon > 0$. Предполагается, что $x_1^1 = a_1 + (1 - \alpha)(b_1 - a_1)$ и $x_2^1 = a_1 + \alpha(b_1 - a_1)$, $\alpha \in]0,1[$ и вычисляется значение функции в этих точках $f(x_1^1), f(x_2^1)$. Считается, что интервал локализации уже определён на $[a_k, b_k]$. Выполняется итеративный поиск экстремума:

– **ШАГ 1.** Если $b_k - a_k < \varepsilon$, то экстремум найден. В противном случае, если $f(x_1^k) > f(x_2^k)$, переходим к шагу 2, если $f(x_1^k) \leq f(x_2^k)$, то перейти к шагу 3.

– **ШАГ 2.** Полагается, что $a_{k+1} = x_1^k$, $b_{k+1} = b_k$, $x_1^{k+1} = x_2^k$, $x_2^{k+1} = a_{k+1} + \alpha(b_{k+1} - a_{k+1})$. Вычисляется $f(x_2^{k+1})$ и увеличивается k . Перейти на ШАГ 1.

– **ШАГ 3.** Полагается, что $a_{k+1} = a_k$, $b_{k+1} = x_2^k$, $x_1^{k+1} = a_{k+1} + (1 - \alpha)(b_{k+1} - a_{k+1})$, $x_2^{k+1} = x_1^k$. Вычисляется $f(x_1^{k+1})$ и увеличивается k . Перейти на ШАГ 1. [4]

На рисунках 4.1, 4.2 представлены результаты работы алгоритма золотого сечения при решении задачи безусловной оптимизации целевой функции (21).

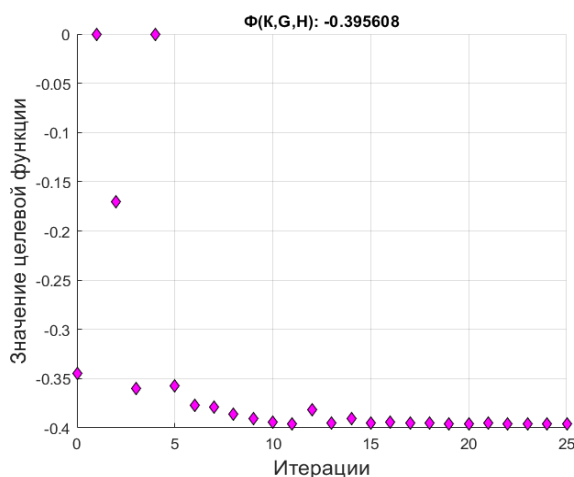


Рис. 4.1 Итеративный процесс оптимизации целевой функции со значением вычисленной функции на каждом шаге. Значение целевой функции показано отрицательным, потому что решается задача максимизации.

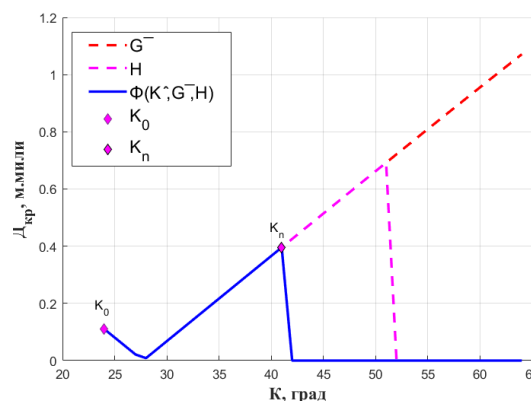


Рис. 4.2 Результаты работы алгоритма золотого сечения при максимизации целевой функции. На графике функции показано начальное значения $\hat{D}_{кр}(K_0, \bar{t})$ при следовании K_0 , а также оптимального значения $\hat{D}_{кр}(K_n, \bar{t})$ эффективного манёвра K_n с учётом ограничений (17, 18, 19).

Возвращение судна на линию заданного пути

Заключительным этапом расхождения является расчёт манёвра возврата судна в заданную путевую точку p_{i+1} из точки $p_s(\tau, \tau_s)$, которая определяется с помощью параметра τ_s – верхней границы временного диапазона после прохождения момента $T_{кр}$. В таком случае новый курс для возврата в очередную путевую точку вычисляется, как:

$$K_B = P(p_s(\tau, \tau_s), p_{i+1})$$

Следует отметить, что, в некоторых случаях, новая очередная путевая точка p_{i+1} может не совпадать с начальной очередной путевой точкой, выбранной на этапе построения ЛЗП по ряду причин, связанных с изменением условий плавания.

На рисунке 5 показана траектория безопасного маневрирования собственного судна для обеспечения собственной безопасности методом выполнения манёвра курсов и последующего возвращения в назначенную очередную путевую точку.

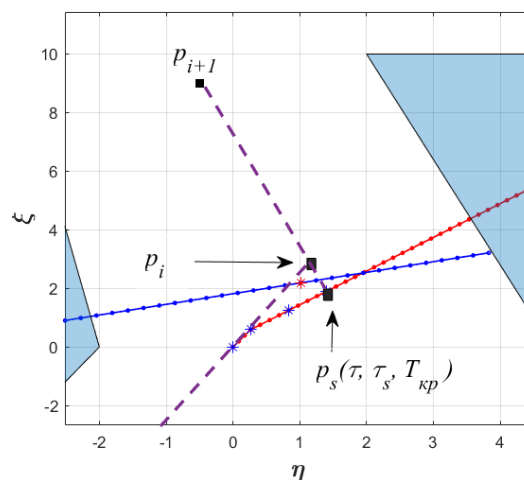


Рис. 5. Последовательность манёвров собственного судна методом маневрирования курсом для расхождения с судном-целью, при $d_{доп} = 0,4$ м. мили и последующим возвращением на очередную путевую точку.

Заключение

В данном исследовании поставлена задача разработки комплексного метода автоматического выбора последовательности манёвров собственного судна, как объекта управления с динамической опасностью – судном-целью, имеющему свой вектор движения в условиях чрезмерного сближения. Такая последовательность манёвров определяет эффективную траекторию движения, учитывающую наличие опасностей среды. Такая траектория состоит из двух последовательных манёвров:

– Манёвра курсом для расхождения собственного судна с судном-целью на безопасном расстоянии;

– Манёвра курсом для следования судна из точки окончания манёвра до очередной заданной путевой точки по скорректированной ЛЗП.

Для решения поставленной задачи был применён комплекс математических методов: дискретная математика, теория графов, математическое моделирование, методы численной оптимизации и т.д. Работоспособность предложенной в статье формализованной структуры подтверждается результатами численного моделирования. Вычисление некоторых параметров, которые заданы в исследовании константами требует детального изучения, а разработка методов их задания является областью дальнейших исследований в области автономного судовождения.

Литература

1. Астреин В.В., Филатов В.И. Принципы автоматического мониторинга и контроля движения судна в режиме реального времени. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1 часть 1, С. 158—168.
2. Астреин В.В., Филатов В.И. Ситуационная модель автоматического мониторинга безопасности судовождения. Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2 часть 1. С. 174—184.
3. Астреин, В. В. Положения и методы разработки автоматического мониторинга безопасности судовождения / В. В. Астреин, В. И. Филатов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1(57). – С. 188-197.
4. Габасов Р. Методы оптимизации: пособие / Р. Габасов [и др.]. - Минск: М54 Издательство «Четыре четверти», 2011. - 472 с.: ил.
5. Гладких Б. А. Методы оптимизации и исследование операций для бакалавров информатики. Ч. II. Нелинейное и динамическое программирование: учебное пособие. — Томск: Изд-во НТЛ, 2011. — 264 с.
6. Ковалев, М. Я. Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов / М. Я. Ковалев, Б. М. Розин, И. А. Шатерник // Информатика. – 2021. - Т. 18, № 4. – С. 79–95.
7. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн, Г.; Корн, Т.; Изд-во: М.: Наука, 1978 г.
8. НД № 2-030101-037 Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) Российского морского регистра судоходства, 2020.
9. Препарата Ф., Шеймос М. Раздел 2.2: Задачи локализации точек. // Вычислительная геометрия: Введение. Москва: Мир, 1989.
10. Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14
11. Смоленцев С. В. Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / С.В. Смоленцев // Вестник ГМУРФ им. адм. С.О. Макарова. 2016. Выпуск 2 (36). С. 7 – 15.
12. Филатов, В. И. Разработка модели судна-робота с автоматической выработкой программы движения / В. И. Филатов, В. В. Астреин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 4-1. – С. 312-320.
13. Филатов В.И. Технология интеллектуального анализа и синтеза для решения комплекса задач оптимизации рейса морского судна. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. (2.9.7) – Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2023. – 169 с.
14. Якушенков А.А. Автоматизация судовождения. К.Н. Денисов, В.Т. Кондрашихин., А.П. Ющенко. Изд-во «Транспорт», 364 с.1967.

References

1. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov. Principles of automatic monitoring and control ship movements in real time, Marine intellectual technologies. 2023. № 1 part 1, P. 158—168.
2. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Automatic situational monitoring System for Navigation Safety, Marine intellectual technologies. 2022. № 2 part 1. P. 174—184.
3. Vadim V. Astrein, Viktor I. Filatov, Provisions and methods for the development of automatic monitoring of navigation safety, Marine intellectual technologies. 2022. № 3 part 1. P. 188—197.
4. Gabasov R. Metody optimizatsii: posobie [Optimization methods, study manual]. R. Gabasov [i dr.]. - Minsk: M54 Izdatel'stvo «Chetyre chetverti», 2011. - 472 s.: il.
5. Gladkikh B. A. Metody optimizatsii i issledovanie operatsiy dlya bakalavrov informatiki. Ch. II. Nelineynoe i dinamicheskoe programmirovaniye: uchebnoye posobie [Optimization methods and Analysis for Informatic Bachelors]. — Tomsk: Izd-vo NTL, 2011. — 264 s.
6. Kovalyov M. Ya., Rozin B. M., Shaternik I. A. Approach to optimizing charging infrastructure of autonomous trolleybuses for urban routes. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 79–95/
7. Korn, G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Encyclopedia for scientific staff and engineers]. Korn, G.; Korn, T.; Izd-vo: M.: Nauka, 1978 g.

8. ND № 2-030101-037 Polozheniya po klassifikatsii morskikh avtonomnykh i distantsionno upravlyaemykh nadvodnykh sudov (MANS) Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Classification Provisions for autonomous and remote-controlled marine Vessels AUV], 2020.
9. Preparata F., Sheymos M. Razdel 2.2: Zadachi lokalizatsii tochek. Vychislitel'naya geometriya [Problem of Points localization, Computation geometry]: Vvedenie. Moskva: Mir, 1989.
10. Smolentsev S. V. Kontseptsiya avtomatizirovannoy intellektual'noy sistemy raskhozhdeniya sudov [Intellectual automated system of Vessel's maneuvering Concept]. S. V. Smolentsev, B. V. Afanas'ev, A. E. Filyakov, D. V. Kunits. Ekspluatatsiya morskogo transporta. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14
11. Smolentsev S. V. Avtomaticheskii sintez resheniy po raskhozhdeniyu sudov v more [Automated Synthesis of maneuvering solutions of vessels at sea]. S.V. Smolentsev. Vestnik GMURF im. adm. S.O. Makarova. 2016. Vypusk 2 (36). S. 7 – 15.
12. Viktor I. Filatov., Astrein V. Vadim. Development of Vessel-Robot's Model with automatic generation of Steering program. intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 312—320.
13. Filatov V.I. Tehnologiya intellektual'nogo analiza i sinteza dlja reshenija kompleksa zadach optimizacii rejsa morskogo sudna [Intellectual analysis and synthesis technology for solvation of ship's route optimization problem]. Diss. na soisk. uch. st. k.t.n. (2.9.7) – Novorossiysk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2023. – 169 s.
14. Jakushenkov A.A. Avtomatizacija sudovozhdenija [Automatization of ship's Navigation]. K.N. Denisov, V.T. Kondrashihin., A.P. Jushhenko. Izd-vo «Transport», 364 s.1967.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Филатов Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Viktor I. Filatov, Ph.D. (Eng.), assistant professor, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Filatov_viktor1994@mail.ru.

Астреин Вадим Викторович, доктор технических наук, профессор, капитан дальнего плавания, государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Vadim V. Astrein, Dr. Sci. (Eng), Master Marine, Professor of the Department of Navigation, Admiral Ushakov Maritime State University 93, Lenina Avenue, Novorossiysk, Russian Federation. E-mail: Astrein-vadim@rambler.ru.

Боран-Кешишьян Анастас Леонидович, кандидат технических наук, доцент, проректор, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 353924, Новороссийск, пр-т Ленина, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Anastas L. Boran-Keshishyan, Ph.D. Sci. (Eng), Assistant Professor, vice-rector, Admiral Ushakov State Maritime University, 353924, Russia, Novorossiysk, Lenin's avenue, 93. e-mail: bk.anastas@gmail.com

Михеева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Tatiana A. Mikheeva, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Ship Design and Construction, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod city, Nesterova str., 5, e-mail: MiheevaTA@yandex.ru

Федосенко Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Систем информационной безопасности управления и телекоммуникаций, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Yuri S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Information Security Systems Management and Telecommunications, Volga State University of Water Transport, 603950, Nizhny Novgorod, Nesterova str., 5, e-mail: fds1707@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 20.10.2024.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 10.11.2024.

Принята к публикации/accepted for publication 20.11.2024.



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 в WORD и PDF, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта и инструкция размещены 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 в WORD.

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) должны 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».

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 должен 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 в 2024г. 19500 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**

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**

Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Теория систем автоматического управления техническими средствами кораблей. Курс лекций – СПб.: НИЦ «Моринтех», 2022. 300 стр.

В курсе лекций рассматриваются основные вопросы теории систем автоматического управления линейных, нелинейных, импульсных, цифровых, адаптивных и оптимальных, основанный на дифференциальных уравнениях и передаточных функциях, способствующих физическому пониманию процессов, происходящих в системах автоматического управления, для дальнейшего усвоения особенностей применения матричных уравнений для исследования устойчивости и качества современных цифровых систем автоматического управления.

Есть в продаже: **цена 1800 руб. + пересылка**