

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

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

110100100100100010101010110101010000110111000110010010010110011001100010 ISSN 2073-7173 (print)
0010100100101011110100110100100010111001001110010101001100100110001100 ISSN 2588-0233 (on line)
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 2 том 1 2021
№ 2 part 1 2021

Morskie intelektual'nye tehnologii



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
1001101001101111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
010001101100000110110110001010010011101001110011010011101001110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 1 2021 Сквозной номер 52

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

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

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

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

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 1 2021 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2021



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН), Санкт-Петербург

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

технический университет, Санкт-Петербург

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



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

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

- **Дмитрий Алексеевич Скороходов**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
- **Сергей Павлович Столяров**, к.т.н., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Ильич Комашинский**, доктор технических наук, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
- **Александр Иосифович Гайкович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Юрий Яковлевич Фершалов**, доктор технических наук, Дальневосточный Федеральный Университет
- **Борис Петрович Ионов**, доктор технических наук, ЦКБ "Айсберг"
- **Кирилл Всеволодович Рождественский**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Елена Ростиславовна Счисляева**, доктор экономических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Иван Борисович Друзь**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Александр Олегович Токарев**, доктор технических наук, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Андрей Николаевич Печников**, доктор технических наук, профессор, НИИ «Центрпрограммсистем»
- **Валерий Александрович Пятакович**, к.т.н., доцент, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова
- **Александр Александрович Родионов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Владимир Васильевич Гаврилов**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Степан Юрьевич Маламанов**, доктор физико-математических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Устинова
- **Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта
- **Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, Дагестанский государственный технический университет
- **Александр Аркадьевич Исаев**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
- **Валерий Феодосиевич Белей**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Виктор Карлович Румб**, кандидат технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)
- **Михайлов Владимир Аркадьевич**, доктор технических наук, профессор, Концерн «Морское подводное оружие — Гидроприбор»

- **Михаил Владиленович Войлошников**, доктор технических наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
- **Виктор Иванович Гнатюк**, доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет
- **Александр Викторович Кириченко**, доктор технических наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова
- **Юрий Павлович Потехин**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Сергей Георгиевич Чулкин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Станислав Альбинович Скоморовский**, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Игорь Иванович Туркин**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Олег Валентинович Хруцкий**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
- **Валентин Илдарович Халиулин**, доктор технических наук, профессор, Центр композитных технологий КНИТУ-КАИ

**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,
- **Sergei P. Stoljarov**, Ph.D. (Eng), State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir I. Komashinsky**, Dr.Sci.(Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science
- **Aleksandr I. Gaikovich**, Dr. Sci. (Eng), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Yuriy Ya. Fershalov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Far Eastern Federal University
- **Boris P. Ionov**, Dr. Sci. (Eng), Central Design Bureau "Iceberg"
- **Kirill V. Rozhdestvenskij**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Rodionov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Vladimir V. Gavrilov**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Elena R. Schislaeva**, Dr.Sci.(Econ), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Ivan B. Druz**, Dr.Sci.(Eng), professor, Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi
- **Alexander O. Tokarev**, Dr.Sci.(Eng), Siberian State University of Water Transport
- **Andrei N. Pechnikov**, Dr.Sci.(Eng), professor, Research Institute «CENTERPROGRAMSYSTEM»
- **Valeriy A. Pyatakovich**, Associate Professor, Ph.D. (Eng). Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov
- **Stepan Y. Malamanov**, Dr. Sci. (Phys & Math.), Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after Ustinova
- **Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor, Siberian state University of water transport
- **Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Dagestan State Technical University
- **Alexander A. Isaev**, Dr. Sci. (Econ), Ph.D. (Eng.), Vladivostok state university of economics and service
- **Valeriy F. Beley**, Dr.Sci. (Eng), professor, Kaliningrad State Technical University
- **Victor K. Rumb**, Ph.D.(Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
- **Alexander A. Tarantsev**, Ph.D.(Eng.), professor, Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
- **Vladimir A. Mihajlov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Concern "Sea Underwater Weapon - Hidropribor"
- **Michael V. Voyloshnikov**, Dr.Sci. (Eng), professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi
- **Victor I. Gnatyuk**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Kaliningrad state technical university
- **Aleksandr V. Kirichenko**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
- **Jurij P. Potechin**, Associate Professor, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Sergei G. Chulkin**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

- **Stanislav A. Skomorovskij**, Associate Professor, Ph.D. (Eng), St. Petersburg State Marine Technical University
- **Igor I. Turkin**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Oleg V. Chruckijj**, Dr.Sci.(Eng), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg
- **Valentin I. KHaliulin**, Dr.Sci.(Eng), professor, Center of Composite Technology, KNRTU-KAI



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

Бордученко Ю.Л., Малыгин И.Г., Каминский В.Ю., Аксёнов В.А. Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути.....	14
Половинкин В.Н., Федулов С.В., Соловьев Д.Н., Мизиркина Н.Н. Рационализация организации новых производств и технологических процессов на судоремонтных предприятиях ВМФ в годы Великой Отечественной войны.....	26

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Козин В.М. Зависимость напряженно-деформированного состояния ледяного покрова от его физико-механических свойств в условиях изгибно-гравитационного резонанса.....	37
Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Влияние вибрационных нагрузок на прочность листовых композитных элементов судовых конструкций.....	43

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения Часть 3 Применение твердотельного моделирования для получения кромок отверстий в сферических участках корпусов.....	48
---	----

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бурмистров Е.Г., Давыдов Е.А., Корнев А.Б., Роннов Е.П. Реализация общих принципов формирования информационной среды для технического обслуживания и ремонта судовых механизмов в Электронном паспорте изделия.....	54
Глушко Е.В., Морозова Н.Т., Фершалов Ю.Я., Портнова О.С. Профилирование червячной фрезы для нарезания внутренней цилиндрической резьбы.....	60
Бокатова А.А., Герасимов Н.И. Износ связей корпусных конструкций судов атомного технологического обслуживания ВМФ.....	64
Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. Влияние климатических факторов на работоспособность полимерных покрытий для судовых конструкций.....	69

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Пассар А.В., Тимошенко Д.В., Бердник А.Н. Исследования радиально-осевой турбины импульсной системы наддува судового дизеля.....	74
--	----

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Мартынов В.Л., Дорошенко В.И., Божук Н.М., Ксенофонтов Ю.Г. Лазерные технологии передачи данных в водной среде в вопросах организации подводных беспроводных сетей связи.....	80
--	----

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Аксёнов В.А. Оценка экологической эффективности судоходной компании.....	86
Иванов А.Ю., Комашинский В.И., Соколов А.Н. Математическое моделирование характеристик качества обслуживания сообщений в информационно-телекоммуникационной сети водного транспорта.....	92
Фахми Ш.С., Селиверстов С.А., Костикова Е.В., Муксимова Р.Р., Титов В.О. Видеосистема наблюдения за морскими судами в реальном времени.....	98
Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н., Родина Н.С. Совершенствование прогнозирования разливов нефти от подводных источников.....	106

Круглеевский В.Н., Вислогузов В.В., Таранцев А.А., Турусов С.Н. Новые функции мультикритериальных судовых систем пожарной сигнализации.....	118
Факми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Поточковая обработка видеоинформации морских сюжетов с использованием расширенной инструкции процессора.....	124
Нгуен Тхай Зыонг Исследование метода определения истинной видимости на судах на основе радиолокационной карты и диаграммы интенсивности света маяка (на английском языке).....	132
Шаталова Н.В., Михов О.М., Бородина О.В. Потенциал развития логистики Арктической зоны РФ за счет применения дронов.....	137
Искандеров Ю.М., Свистунова А.С., Хасанов Д.С., Чумак А.С. Интеллектуальная поддержка принятия решений в логистических системах.....	145

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Маневровые качества судов с колесным движительно-рулевым комплексом.....	154
--	-----

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Чаплыгин В.Г., Каранина Е.В., Мороз В.Н. Влияние трансфера технологий на реализацию инновационных проектов в инновационно-промышленном кластере (на примере АО «Объединенная судостроительная корпорация»).....	160
--	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

Скороходов Д.А., Крылов Ю.Е., Стариченков А.Л. Математическая модель динамики судна на подводных крыльях, как сложной технической системы.....	168
Исаев А.А. Человек как кибернетическая система.....	179
Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Полипеременные условно-зависимые предикаты в модели представления знаний автономных мобильных интеллектуальных агентов.....	184

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Карпенко А.А. Имитационное моделирование эксплуатации морских транспортных средств с учетом ветро-волнового режима.....	191
Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Планирование рейсооборота добывающих судов.....	200

CONTENTS	page
SHIP BUILDING	
Yuri L. Borduchenko, Igor G. Malygin, Valery Yu. Kaminsky, Vladimir A. Aksenov The nuclear icebreaker fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. Challenges and prospects for the development of the Northern Sea Route.....	14
Valerij N. Polovinkin, Sergey V. Fedulov, Dmitry N. Soloviev, Nataliya N. Mizirkina Rationalization of the organization of new industries and technological processes at the ship-repair enterprises of the Navy during the Great Patriotic War.....	26
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Viktor M. Kozin Dependence of the stress-strain state of the ice cover on its physical and mechanical properties under conditions of bending-gravitational resonance.....	37
Sergey I. Koryagin, Nikolay L. Velikanov Oleg V. Sharkov Influence of vibration loads on the strength of sheet composite elements of ship structures.....	43
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Sergey A. Rusanovskiy Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges Part 3 Applying 3d-modeling to opening's bevel in spherical sections of hulls..	48
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Evgeny G. Burmistrov, Evgeny A. Davydov, Andrey B. Kornev, Evgeny P. Ronnov Implementation of the general principles of creating an information environment for the maintenance and repair of ship mechanisms in the Electronic Product Passport.....	54
Elena V. Glushko, Nina T. Morozova, Yuriy Ya. Fershalov, Olesya S. Portnova Hob cutter shaping for internal straight thread.....	60
Anastasiia A. Bokatova, Nikolai I. Gerasimov Wear of hulls and hull structures of Russian NAVY auxiliary vessels.....	64
Sergey I. Koryagin, Oleg V. Sharkov, Nikolay L. Velikanov Influence of climatic factors on the performance of polymer coatings for ship structures.....	69
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Andrey V. Passar, Denis V. Timoshenko, Aleksey N. Berdnik Research of the radial-axial turbine of the marine diesel engine impulse turbocharging system.....	74
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Victor L. Martynov, Victor I. Doroshenko, Nicolay M. Bozhuk, Yuriy G. Ksenofontov Laser technologies of data transfer in aquatic environment in the organization of underwater wireless communication networks.....	80
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Marin L. Marinov., Vladimir A. Aksenov Evaluating the effectiveness of a shipping company environmental protection.....	86
Alexander Yu. Ivanov, Vladimir IL. Komashinskiy, Andrei N. Sokolov Mathematical modeling of the characteristics of the quality of service of messages in the information and telecommunication network of water transport.....	92
Shakeeb S. Fahmi, Svyatoslav A. Seliverstov, Elena V. Kostikova, Roza R. Muksimova, Viktor O. Titov Real-time marine vessel surveillance video system.....	98
Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Natalia S. Rodina Improving the forecasting of oil spills from underwater sources.....	106
Vladimir N. Kruglevskiy, Victor V. Visloguzov, Alexandr A. Tarantsev, Sergey N. Turusov New functions of multicriteria ship fire alarm systems.....	118
Shakeeb S. Fahmi, Natalia V. Shatalova, Elena V. Kostikova Streaming video processing of marine scenes using advanced processor instructions.....	124

Nguyen Thai Duong Research on determine method of the true visibility on vessels based on radar and light intensity chart of the lighthouse (In English) 132

Natalia V. Shatalova, Oleg M. Mikhov, Olga V. Borodina Potential for development of logistics at the Arctic zone of the Russian Federation through the use of drones..... 137

Yury M. Iskanderov, Alexandra S. Svistunova, Dmitry S. Khasanov, Alexandr S. Chumak Intelligent decision support in logistics systems..... 145

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Lyudmila S. Grosheva, Vladimir I. Merzlyakov, Valeriy I. Plyushchayev Maneuvering qualities of vessels with a wheeled propulsion and steering..... 154

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Vladimir.G. Chaplygin, Elena V. Karanina, Vadim N. Moroz The impact of technology transfer on the implementation of innovative projects in the innovative industrial cluster (on the example of United Shipbuilding Corporation JSC)..... 160

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE

Dmitriy A. Skorokhodov, Yuriy E. Krylov, Aleksey L. Starichenkov Mathematical model of the dynamics of a hydrofoil vessel as a complex technical system..... 168

Alexander A. Isaev Human as the cybernetic system..... 179

Vladimir B. Melekhin, Mikhail V. Khachumov Polyvariable conditionally dependent predicates in the knowledge representation model of autonomous mobile intelligent agents..... 184

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Aleksander A. Karpenko Simulation of marine vehicles operation in the state of wind and wave conditions..... 191

Svetlana V. Lisienko, Nina S. Ivanko Planning of the voyage turnover of producing vesselzone of the Far Eastern fisheries basin)..... 200

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 629.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.001>

Атомный ледокольный флот России в первой четверти XXI века. Задачи и перспективы освоения Северного морского пути

Ю.Л. Бордученко¹ e-mail: yu-borduchenko@yandex.ru, И.Г. Малыгин¹ e-mail: malygin_com@mail.ru,
В.Ю. Каминский¹ e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, В.А. Аксенов² e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Российский университет транспорта

Аннотация. Арктическая зона в XXI веке становится важнейшим гарантом устойчивого развития Российской Федерации. Вклад Севера в экономику России во многом будет определяться масштабами и темпами развития Арктической транспортной системы. Необходимо расширение коммерческого и научно-исследовательского судоходства, развитие транспортных узлов и коридоров, полярной авиации, грузопассажирских морских полярных перевозок. В этих условиях Россия в целях обеспечения своих геополитических интересов должна постоянно поддерживать активное присутствие в этом регионе. Оно выражается в проведении научных исследований, разведке и добыче полезных ископаемых, обеспечении морских грузоперевозок с использованием ледоколов и специализированных ледокольно-транспортных судов. Этого невозможно достичь без развития уникального атомного ледокольного флота. В настоящее время Россия является мировым лидером в области применения атомного ледокольного флота для решения транспортных задач в морях Арктики и неарктических замерзающих морях. Для успешной конкуренции России необходимо не упускать этого лидерства и постоянно развивать и совершенствовать атомный ледокольный флот как ключевое звено инфраструктуры функционирования Северного морского пути. В статье представлен краткий обзор текущего состояния и перспектив развития атомного ледокольного флота России. Показана определяющая роль атомного ледокольного флота в обеспечении судоходства по трассам Северного морского пути для развития экономики Арктического региона России.

Ключевые слова: атомный ледокольный флот, Северный морской путь, Арктический регион России, перспективы развития.

The nuclear icebreaker fleet of Russia in the first quarter of the XXI century. Challenges and prospects for the development of the Northern Sea Route

Yuri L. Borduchenko¹ e-mail: yu-borduchenko@yandex.ru, Igor G. Malygin¹ e-mail: malygin_com@mail.ru,
Valery Yu. Kaminsky¹ e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, Vladimir A. Aksenov² e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russian Federation, ²Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

Abstract. The Arctic zone in the XXI century is becoming the most important guarantor of the sustainable development of the Russian Federation. The contribution of the North to the Russian economy will largely be determined by the scale and pace of development of the Arctic Transport System. It is necessary to expand commercial and research shipping, develop transport hubs and corridors, polar aviation, and cargo and passenger sea polar transportation. In these circumstances, Russia must constantly maintain an active presence in this region in order to ensure its geopolitical interests. It is expressed in conducting scientific research, exploration and extraction of minerals, providing sea cargo transportation using icebreakers and specialized icebreaker-transport vessels. This cannot be achieved without the development of a unique nuclear icebreaker fleet. Currently, Russia is a world leader in the use of nuclear-powered icebreaking fleet for solving transport problems in the Arctic seas and non-Arctic freezing seas. For successful competition, Russia must not lose this leadership, constantly develop and improve the nuclear icebreaker fleet as a key link in the infrastructure of the Northern Sea Route. The article provides a brief overview of the current state and prospects for the development of the Russian nuclear icebreaker fleet. The article shows the decisive role of the nuclear icebreaker fleet in ensuring navigation along the Northern Sea Route for the development of the economy of the Arctic region of Russia.

Keywords: nuclear icebreaker fleet, the Northern sea route, the Arctic region of Russia, prospects of development.

Введение

Вдоль всего северного побережья России протянулась национальная морская коммуникация – Северный морской путь (СМП). Под акваторией Северного морского пути понимается водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации и ограниченное с востока линией разграничения морских пространств с

Соединенными Штатами и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада – меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота и Югорский Шар [1].

Северный морской путь как национальная транспортная коммуникация России в Арктике имеет исключительное значение для обеспечения дальнейшего эффективного развития экономики северных регионов и государства в целом. В интересах страны он обеспечивает прежде всего функционирование транспортной инфраструктуры в

особенно труднодоступных районах архипелагов, островов, морей и побережья Крайнего Севера, центральных районов Восточной и Западной Сибири, связывая в единую систему меридионально расположенные материковые водные пути великих сибирских рек и широтнонаправленные морские трассы перемещения на запад и восток страны каботажных и экспортных грузопотоков. Помимо этого, СМП – высокоширотная транзитная арктическая судоходная магистраль, которая может служить альтернативой существующим межконтинентальным транспортным связям между странами Атлантического и Тихоокеанского бассейнов через Суэцкий и Панамский каналы [2, 3].

С точки зрения потенциальных запасов углеводородов, минерального сырья и других полезных ископаемых, древесины значение Арктической зоны для России трудно переоценить. Здесь сосредоточено примерно 140 млрд. тонн углеводородов, из которых 87% приходится на природный газ. Порядка 70% запасов углеводородов (около 100 млрд. т) сосредоточены в Карском и Баренцевом морях, всего же, по предварительным оценкам, российский арктический шельф содержит около 100 млрд. т углеводородных ресурсов. Арктический бассейн в настоящее время является одним из важнейших, исходя из перспективы развития и транспортного обеспечения транспортировки углеводородного сырья. Сегодня Арктика обеспечивает около 40% национального дохода России, здесь формируется 90% объема общероссийского экспорта [4, 5].

1. Атомный ледокольный флот

Для осуществления перевозок грузов по СМП необходимы ледокольно-транспортные суда и ледокольный флот. В настоящее время арктический транспортный флот насчитывает 204 транспортных судна суммарным дедвейтом 3,4 млн. т, в том числе под флагом России – 174 судна суммарным дедвейтом 2,0 млн. т. На трассах СМП работают суда-снабженцы, лесовозы, танкеры, балкеры, контейнеровозы, все они имеют классы ледового усиления Arc4 – Arc7, позволяющие круглогодично осуществлять работу в арктических условиях [5]. В январе 2016 г. введен в строй пилотный арктический газозав сжиженного природного газа (СПГ) ледового класса Arc7 для проекта «Ямал СПГ» [6].

Регулярное коммерческое судоходство по СМП началось в 1920 году. С этого времени основные этапы освоения новых трасс плавания и расширения сроков навигации по СМП определялись наращиванием мощности ледокольного флота.

1.1 Ледоколы проекта 1052

Сегодня основой безопасности плавания транспортных судов в ледовых условиях арктического побережья России является атомный ледокольный флот. Изначально он создавался для обеспечения работы Норильского промышленного района. Для круглогодичной навигации в Западном районе Арктики потребовалось создание мощного ледокольного флота и инфраструктуры на побережье Карского моря и берегах реки Енисей.

Опыт многолетней эксплуатации атомного ледокола «Ленин» (рис. 1) позволил создать более совершенные суда второго поколения – линейные атомные ледоколы типа «Арктика» (рис. 2).

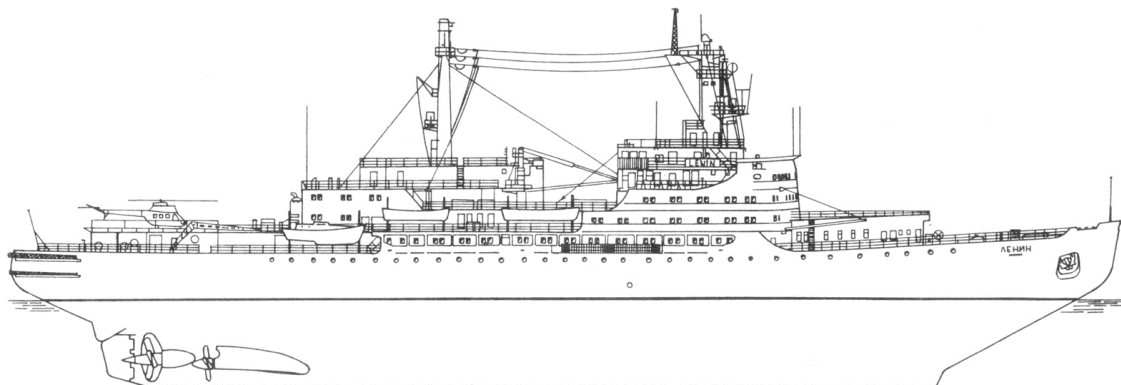


Рис. 1. Атомный ледокол «Ленин»

Новые атомные ледоколы превосходят первый атомный по мощности энергетической установки в 1,7 раза, по энерговооруженности и удельной тяге – в 1,5 раза. На ледоколах проекта 1052 и его модификаций принято иное, чем на ледоколе

«Ленин», распределение мощности между гребными валами – в соотношении (1/3: 1/2: 1/3) и (1/4: 1/2: 1/4), соответственно; они отличаются формой обводов и конструкцией корпуса; существенно изменены состав и компоновка энергетического оборудования.

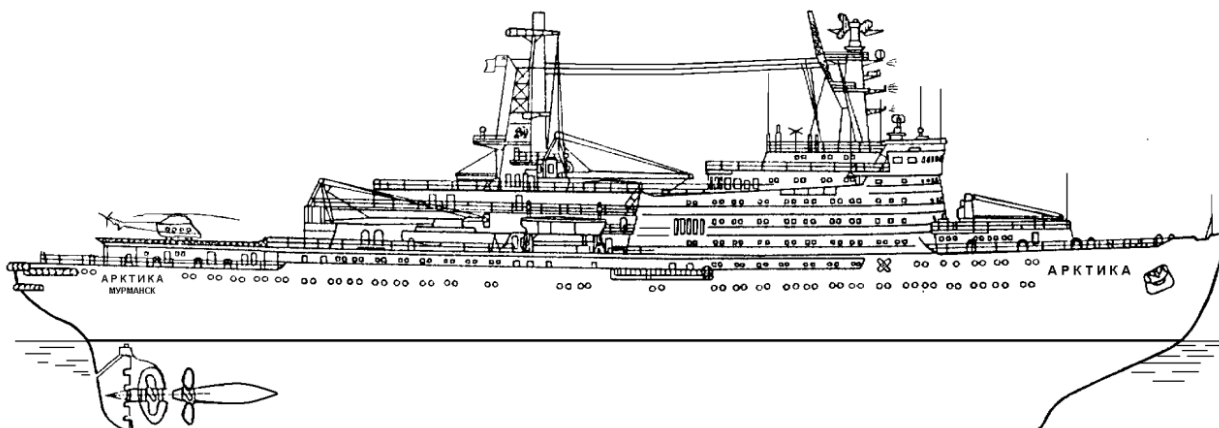


Рис. 2. Атомный ледокол «Арктика» проекта 1052

Гребная электрическая установка (ГЭУ) ледоколов типа «Арктика» также отличается своим типом и параметрами от установки ледокола «Ленин». На ледоколах проекта 1052 смонтирована ГЭУ переменного-постоянного тока: в ее состав входят главные генераторы переменного тока, статические выпрямители и гребные электродвигатели постоянного тока.

С вводом в строй в 1970-х – 1990-х гг. новых атомных ледоколов и специализированных судов ледового плавания начался очередной этап развития арктического судоходства: была достигнута основная цель первого этапа программы развития СМП – навигация на его западном участке (от новоземельских проливов до пролива Вилькицкого) стала круглогодичной.

На реализацию программы перехода к круглогодичной навигации на западном участке СМП было затрачено примерно 200 млрд. долл. (в ценах 1975 г.) [3]. В эту сумму вошли грузовые суда арктического плавания, порты на Енисее, инфраструктура и атомные и дизель-электрические ледоколы [3]. Выбор атомной энергетики для ледоколов неслучаен с учетом выполняемых задач.

Высокие ледокольные качества, надежность работы главных и вспомогательных механизмов и систем были убедительно продемонстрированы во время высокоширотных рейсов атомных ледоколов второго поколения. Самым знаменитым таким рейсом явился научно-практический рейс атомного ледокола Арктика к Северному полюсу в августе 1977 г. (рис. 3).

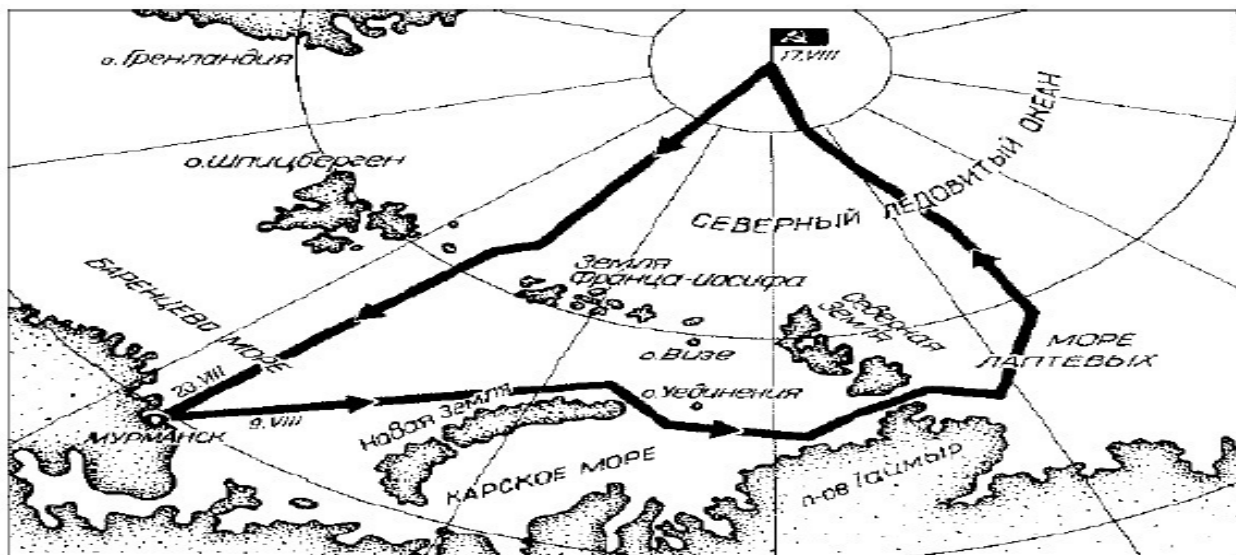


Рис.3. Схема маршрута похода атомного ледокола «Арктика» к Северному полюсу (9 – 23 августа 1977 г.)

Рейс проходил по маршруту Мурманск (10 августа) – мыс Желания (11 августа) – пролив Вилькицкого – море Лаптевых (130° в. д.) – Северный полюс (17 августа, 4 часа по московскому времени). Поход завершился в Мурманске 23 августа. За 13 суток ледокол прошел 3852 мили, из них 1300 миль – во льдах (рис. 3). Первый выход надводного судна в

точку Северного полюса стал историческим событием в освоении Арктики и в практике мореплавания.

Несколько высокоширотных рейсов совершил в 1970-х гг. – 1980-х гг. атомный ледокол «Сибирь». Маршрут высокоширотного рейса 1978 г. показан на рис. 4.



Рис. 4. Маршрут высокоширотной проводки дизель-электрохода «Капитан Мышевский» весной 1978 г.

Эти рейсы также были экспериментальными, потому что в это время года маршруты в столь высоких широтах не прокладывались, опыта плавания не было. Было даже не очень понятно, как поведет себя в этих условиях ледяной покров и как он будет взаимодействовать с пропульсивным комплексом судов, потому что не были достоверно известны механические свойства арктического льда в это время года.

1.2 Ледоколы проекта 10521, 10580

Опыт эксплуатации двух первых ледоколов проекта 1052 – «Арктики» и «Сибири», собранные в высокоширотных походах дополнительные сведения о свойствах и поведении ледяного покрова и самого судна в высоких широтах в весенний период, принятые в 1981 г. Конференцией Международной морской организацией (ИМО) документы по безопасности ядерных торговых судов заставили внести изменения в проект атомного линейного ледокола, создать его модернизацию – проект 10521. Были внесены конструктивные изменения, в

частности, ледоколы получили более совершенную реакторную установку, оснащены системой пневмообмыва корпуса, которая отсутствует у ледоколов проекта 1052.

По этому проекту были построены и вступили в строй в 1985 г. и 1989 г. ледоколы «Россия» и «Советский Союз», в 1992 г. – атомный ледокол «Ямал». В 1989 г. на стапеле Балтийского завода был заложен шестой атомный ледокол «Урал», получивший в 1995 г. новое имя – «50 лет Победы».

В связи с мелководностью подходов к расположенному в реке Енисей порту Дудинка были спроектированы и построены специализированные атомные ледоколы с малой осадкой – «Таймыр» и «Вайгач», специально предназначенные для работы на мелководных арктических морских акваториях и в устьях великих сибирских рек, главным образом Енисея и Оби (рис. 5). Эти ледоколы проекта 10580 также были оборудованы системой пневмообмыва корпуса, которая улучшает ледопробитость судна.

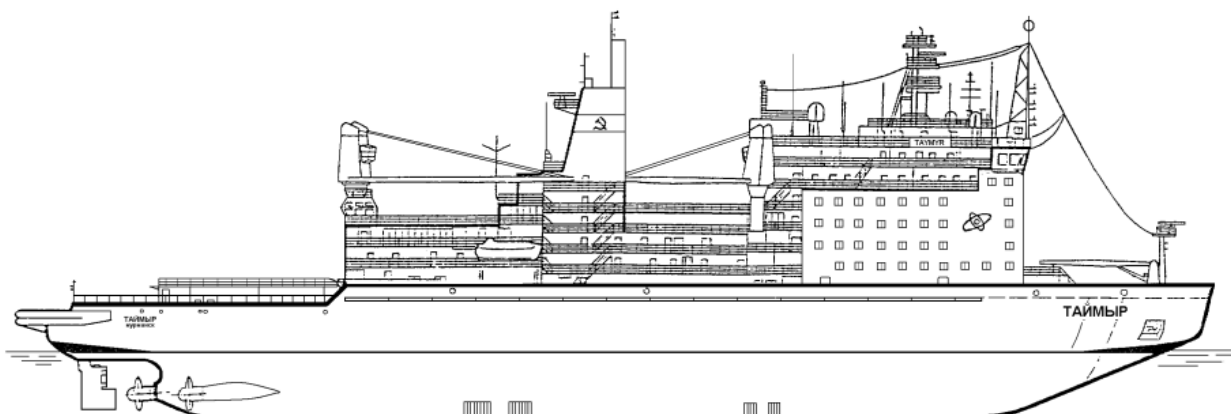


Рис. 5. Атомный ледокол «Таймыр» проекта 10580

Гребная электрическая установка (ГЭУ) ледоколов типа «Таймыр» отличается своим типом и параметрами от установок ледоколов типов «Ленин» и «Арктика». На ледоколах проекта 10580 смонтирована ГЭУ переменного-переменного тока: в

ее состав входят главные генераторы переменного тока и гребные электродвигатели также переменного тока. Управление частотой генерируемого тока осуществляется с помощью циклоконверторов.

Подобная установка была применена на атомном флоте впервые.

1.3 Суда усиленного ледового класса

Параллельно с созданием новых ледоколов строились суда усиленного ледового класса для перевозки грузов Норильского горно-металлургического комбината – атомный

лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть» (рис. 6), серии судов типа «Норильск», «Дмитрий Донской»; проводилось переоснащение современным оборудованием системы навигационно-гидрографического обслуживания работы флота, расширение и реконструкция Дудинского порта.

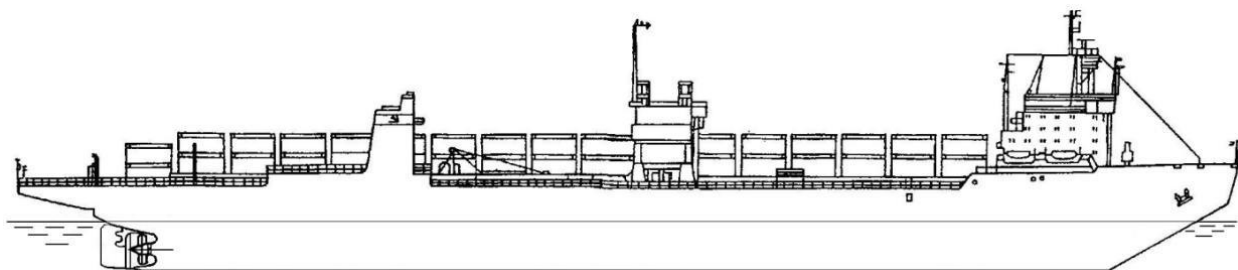


Рис. 6 – Атомный лихтеровоз-контейнеровоз проекта 10081 «Севморпуть»)

Таким образом, за 40 лет (конец 1950-х – конец 1990-х гг.) было построено и введено в эксплуатацию восемь атомных ледоколов («Ленин», «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «Таймыр» и «Вайгач») и одно атомное транспортно-

ледокольное судно – лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть» (табл. 1). Еще один атомный ледокол достраивался на стапеле Балтийского судостроительного завода в Петербурге.

Таблица 1

Основные даты строительства и ввода в строй отечественных атомных судов

Наименование судов	Индекс проекта	Дата		Примечания
		закладки на стапеле	ввода в эксплуатац.	
<i>Ленин</i>	92 / 92M	25.08.1956	03.12.1959	После подъема Государственного флага ледокол был передан ММФ СССР в опытную эксплуатацию
<i>Арктика</i>	1052	31.06.1971	30.12.1974	Государственный флаг на ледоколе поднят 25 апреля 1975 г. в Таллине. В октябре 2008 г. начат вывод ледокола из эксплуатации
<i>Сибирь</i>	1052	29.04.1974	28.12.77	Государственный флаг поднят 5 января 1978 г.; в 1993 г. судно выведено из действия и законсервировано; в 1995 г. из реакторов выгружено ядерное топливо
<i>Россия</i>	10521	20.02.1981	21.12.1985	
<i>Советский Союз</i>	10521	02.11.1983	29.12.1989	Был заложен как <i>Леонид Брежнев</i>
<i>Ямал</i>	10521	28.10.1986	28.10.1992	Был заложен как <i>Октябрьская Революция</i>
<i>50 лет Победы</i>	10521M1	04.10.1989	23.03.2007	Был заложен как <i>Урал</i> . Государственный флаг поднят 23 марта 2007 г. на Балтийском заводе
<i>Таймыр</i>	10580	03.08.1986	30.06.1989	Государственный флаг поднят 7 апреля 1988 г. в Хельсинки
<i>Вайгач</i>	10580	10.04.1987	25.07.1990	Государственный флаг поднят 6 марта 1989 г. в Хельсинки
<i>Севморпуть</i> (лихтеровоз-контейнеровоз)	10081	02.11.1984	31.12.1988	Построен на Керченском судостроительном заводе «Залив» им. Б.Е.Бутомы

2. Грузопоток по СМП

За это время длительная эксплуатация атомных ледоколов показала надежность их ядерных энергетических установок (ЯЭУ), перспективность ее применения на ледокольных судах, возможность создания ледоколов с установками практически любой мощности. Подтвердились такие важные преимущества атомных ледоколов, как:

- неограниченность районов плавания;
- независимость от бункеровочных баз;
- независимость осадки от наличия на борту запасов топлива и других расходных грузов;
- возможность выбора осадки судна с учетом ледовых условий и глубины трассы, мобильность;
- способность длительно поддерживать полную мощность энергетической установки;
- возможность обеспечения оптимальной остойчивости судна.

С помощью ледоколов типа «Арктика» с 1978 г. был осуществлен переход к круглогодичной навигации в западном районе Арктики. Потребность в ней была обусловлена прежде всего необходимостью обеспечения жизнедеятельности и

развития Норильского промышленного района. К середине 1980-х гг. была решена проблема обеспечения устойчивого снабжения отдаленных районов российского Крайнего Севера топливом, промышленными товарами и продовольствием. Увеличились объемы перевозок по трассам Северного морского пути. Их максимум пришелся на конец 1980-х гг.

В навигацию 1987 г. по СМП были перевезены рекордные 6578,8 тыс. т грузов, при этом число судов также достигло рекордного количества – по Северному морскому пути в 1987 г. прошло 1306 судов [7].

Однако затем объемы грузоперевозок и число судов, следовавших по трассам СМП, стали сокращаться. Уже в 2000 г. морскими судами в Арктике было перевезено всего 1587,0 тыс. т грузов различного назначения [7]. На таком низком уровне эти объемы оставались в течение нескольких лет (рис. 7). Только в середине 2000-х гг. начался рост грузопотока по СМП, обусловленный ростом международных транзитных перевозок и ростом экономики российской Арктики].

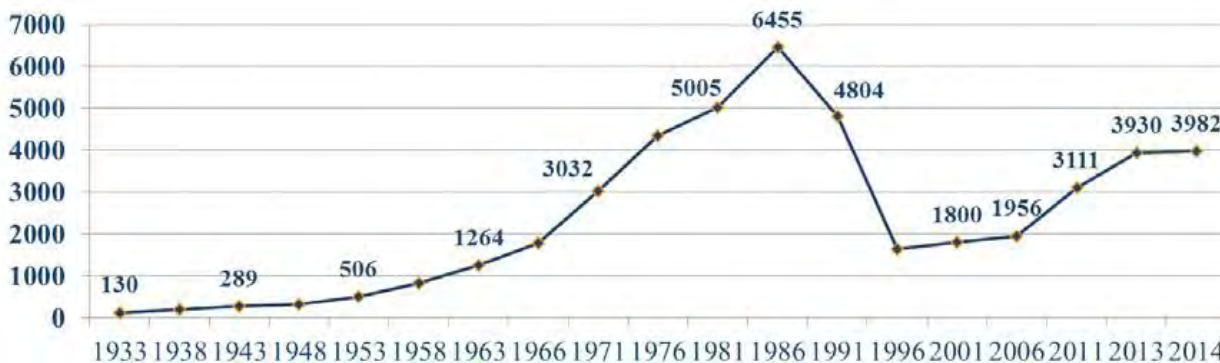


Рис. 7. Грузопоток по Северному морскому пути в 1933 – 2014 гг., тыс. т [8]

3. Состояние и перспективы отечественного морского транспорта в начале XXI столетия

Состояние определялось тремя основными факторами:

- разделом отрасли между бывшими союзными республиками;
- началом радикальных реформ в области экономики, государственного и хозяйственного управления;
- резким сокращением инвестиций в развитие транспорта из федерального бюджета.

Состав действовавшего на Севере ледокольного флота полностью сохранить не удалось. В связи с резким уменьшением объема перевозок по трассам Северного морского пути (см. рис. 7) и сокращением объема финансирования ледокольного флота, вместо проведения ремонта систем и механизмов ледоколы, в том числе атомные, начали выводиться в длительный отстой, а все линейные дизель-электрические ледоколы типа Москва к концу 1990-х гг. были исключены из состава флота и утилизированы.

В 1993 г. из-за потери герметичности трубных систем парогенераторов реакторных установок обоих бортов и невозможности их ремонта (вследствие отсутствия необходимых технологий и

денежных средств на восстановительные работы) был выведен из эксплуатации атомный ледокол «Сибирь». В 1995 г. из его атомных реакторов было выгружено ядерное топливо, и судно поставлено в длительный отстой. Атомный ледокол «Ленин» был выведен из эксплуатации еще в 1989 г. и оборудование его реакторных установок (в том числе корпусов реакторов и трубные системы парогенераторов) использовалось в 1990-х – 2000-х гг. при проведении исследований по программе продления технического ресурса и срока службы оборудования и корпусов атомных ледоколов.

Таким образом, к началу XXI в. в составе линейного ледокольного флота осталось шесть атомных («Арктика», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «Таймыр» и «Вайгач»), причем почти все они нуждались в проведении среднего или капитального ремонта оборудования, механизмов и систем и продлении ресурса и сроков службы основного оборудования. Некоторые атомные ледоколы имели ограничения по мощности реакторных установок (РУ), потому что работали с отключенными секциями парогенераторов, число которых доходило до пяти, и отсутствовала технология восстановления работоспособности парогенераторов.

Отметим, что назначенный ресурс основного оборудования ЯЭУ в то время составлял 100 тыс. часов работы, а срок службы – 25 лет.

Линейные ледоколы отечественного флота, оставшиеся в строю на середину 2000-х гг., были построены в 1970-х – 1980-х гг., поэтому они морально и физически устарели, и их необходимо было исключать из состава флота и заменять новыми.

Снижение объемов грузоперевозок по Северному морскому пути, отсутствие необходимых денежных средств для строительства новых атомных ледоколов, а также неясность в вопросе строительства новых атомных ледоколов вызвали необходимость разработки программы продления ресурса основного оборудования и срока службы атомных ледоколов. Появлению программы предшествовала большая работа по исследованию технического состояния и остаточного ресурса основного механического оборудования, общесудовых систем и устройств, корпуса выведенного из эксплуатации атомного ледокола Ленин. Эти исследования проходили во второй половине 1990-х гг.; итогом их проведения стала разработка ФГУП «ОКБМ им. И.И.Африкантова» (сегодня – ОАО «ОКБМ Африкантов») межведомственной целевой комплексной «Программы продления ресурса до 150 тыс. часов и срока службы до 30 лет систем и оборудования АППУ атомных судов» [9].

Работы по продлению ресурса парогенераторов атомного ледокола «Арктика», которые проводились с 1993 г. до середины 2000-х гг. привели к заключению, что имеются потенциальные возможности для увеличения назначенного ресурса и срока службы оборудования реакторных установок (РУ). Результатом работ стало продление ресурса парогенераторов ледокола «Арктика» сначала до 120 тыс. часов, а затем до 175 тыс. часов и срока его службы до 32 лет, а парогенераторов остальных атомных ледоколов – до 150 тыс. ч и срока службы судов – до 30 лет соответственно. В последующем удалось продлить ресурс оборудования всех атомных ледоколов до 175 тыс. ч, а эксплуатацию действующих ледоколов обеспечить до 2016 – 2020 гг. [9].

Наряду с разработкой Программы продления ресурса парогенераторов атомных ледоколов, была создана технология замены трубных систем парогенераторов, из-за отсутствия которой, в частности, был выведен в отстой ледокол «Сибирь» и введены ограничения мощности ЯЭУ на ряде других ледоколов. Первая в истории отечественного атомного флота замена трубной системы двух парогенераторов реакторной установки была произведена в октябре 2002 г. – феврале 2003 г. на ледоколе «Вайгач», что позволило продлить срок эксплуатации ледокола и использовать его реакторную установку на полную мощность. На практике была отработана технология, которая позволяет продлить срок службы реакторных установок атомных ледоколов сверх установленного ресурса парогенераторов.

В 2004 – 2006 гг. на ледоколе Россия с использованием этой же технологии были заменены шесть из восьми трубных систем парогенераторов реакторных установок обоих бортов и в марте 2007 г.

Регистр подтвердил класс ледокола. В 2005 – 2006 гг. были также проведены работы по продлению ресурса оборудования атомного ледокола «Таймыр», заменены три парогенератора на ледоколе «Ямал». В 2007 г. завершилась кампания топлива в реакторах обоих бортов атомного ледокола Советский Союз. Программу продления ресурса основного оборудования ледокол не проходил, поэтому он был поставлен в отстой с перспективой произвести ремонт основного оборудования, выполнить программу продления ресурса оборудования, перегрузить топливо и сменить атомный ледокол «Россия», который к этому времени выработает все топливо обоих реакторов и, в свою очередь, встанет на длительный ремонт и перегрузку [9].

Мелкосидящий ледокол «Вайгач» встал в начале осени 2011 г. на ремонт и перегрузку топлива, по выходу из дока он ушел в Арктику с продленным на пять лет ресурсом оборудования. Атомный ледокол «Ямал» во второй половине 2012 г. также прошел ремонт и одновременно на его борту началось выполнение программы продления ресурса основного оборудования. Относительно находившегося в отстое атомного ледокола «Сибирь» в 2008 г. было принято решение не вводить его в эксплуатацию [9].

Если обеспечить продление ресурса и срока службы оборудования реакторных установок атомных ледоколов до 175 тыс. часов, то эксплуатация действующих ледоколов будет обеспечена до 2020 гг. А сегодня речь идет уже о возможности продления ресурса ЯЭУ до 200 тыс. часов. Продление ресурса оборудования до 175 тыс. часов и срока службы до тридцати двух лет позволяет начать вывод ледоколов, находящихся сегодня в эксплуатации, еще позже, чем указано выше, и обеспечить работу Северного морского пути без экстренного ввода в строй новых ледоколов. Однако возникающая пауза должна быть использована для постройки новых ледоколов, которые должны вводиться в строй вместо выводимых. Если этого не произойдет, к 2030 г. у России не останется ни одного полярного линейного ледокола – ни атомного, ни дизель-электрического и страна потеряет контроль над работой важнейшей морской национальной магистрали.

В 2003 г. возобновилось строительство атомного ледокола «50 лет Победы» и к концу 2006 г. он был достроен, в феврале 2007 г. прошел ходовые испытания, а 23 марта 2007 г. атомный ледокол «50 лет Победы» был принят в эксплуатацию и на нем поднят российский флаг [10].

Таким образом, сегодня на трассах Северного морского пути действуют линейные двухреакторные атомные ледоколы «Ямал» и «50 лет Победы» (ледоколы «Россия» и «Советский Союз» находятся в отстое), а на мелководных участках – однореакторные «Таймыр» и «Вайгач». Практически все они, за исключением ледокола «50 лет Победы», в середине 2020-х гг. начнут выводиться из действия в связи с выработкой ресурса основного оборудования.

После 2000 г. наметилась тенденция к увеличению объемов морских перевозок в Арктике, в течение 2005 – 2008 гг. они превышали 2 млн. т и продолжают увеличиваться. Однако в условиях

финансового кризиса прирост объемов перевозок по Севморпути замедлился, и масштабные проекты в регионе, связанные с вывозом углеводородного сырья, тогда не заработали [3].

Ближайшим по времени реализации является расширение освоения ОАО НОВАТЭК Ямальских газовых месторождений. Атомные ледоколы с 1976 г. по настоящее время принимают участие в обеспечении доставки грузов на полуостров Ямал в зимний период навигации с выгрузкой судов на

припай. В перспективе Росатомфлот готов осуществлять проводку сухогрузных судов, газовозов и танкеров к полуострову Ямал и в Обскую губу, обеспечивая круглогодичный навигационный цикл работы флота на этом направлении [3].

После начала разработки Ямальских месторождений углеводородов начался заметный рост объема их перевозок по маршруту Ямал - Западная Европа (рис.8).



Рис. 8 Грузоперевозки по Северному морскому пути в 2014 - 2018 гг., млн. т

В течение ближайших лет (до 2020 г.) минимально достаточное количество обеспечивающих атомных ледоколов сохранится на уровне четырех единиц. Однако ледоколы, даже атомные, – не вечны. На основании проведенных

исследований действующим ледоколам был увеличен ресурс основного оборудования и продлен срок службы основного механического оборудования и судовых систем (табл. 2).

Таблица 2

Продление ресурса основного оборудования и срока службы основного механического оборудования и судовых систем действующих атомных ледоколов

Наименование судна	Дата решения об увеличении ресурса и срока службы	Новый ресурс основного оборудования, час.	До какого года продлен срок службы ледокола	Примечание
Ямал	2014	175000	2022	
50 лет Победы	–	–	–	Выработает ресурс основного оборудования 150 тыс. часов после 2030 г.
Таймыр	2017	200000	2025 - 2026	
Вайгач	2017	200000	2023 - 2024	

4. Ледокол проекта 22220

В связи с предстоящим списанием атомных ледоколов по мере их физического износа,

судостроительная промышленность разработала проект универсального атомного ледокола мощностью 60 МВт (ЛК-60Я, пр. 22220) с переменной осадкой (от 8,5 до 10,8 м), который один будет в состоянии заменить два атомных ледокола – типа

«Арктика» и типа «Таймыр». В августе 2012 г. договор на строительство головного универсального ледокола был подписан, срок его сдачи в эксплуатацию был установлен 31 декабря 2017 г. На долгосрочную перспективу (15 – 30 лет) сохранится потребность в четырех – пяти атомных ледоколах, для чего потребуются ввод в эксплуатацию еще четырех ЛК-60Я – соответственно. Всего на Балтийском судостроительном заводе в 2013 – 2020 гг. заложено пять новых атомных ледоколов типа ЛК-

60Я (проект 22220; рис. 9), получивших названия «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия» и «Чукотка». Они все должны войти в эксплуатацию до конца 2026 г. (сроки сдвинулись из-за возникших трудностей в отношениях с украинскими контрагентами). Головной ледокол серии – «Арктика», – в июле 2016 г. был спущен на воду, а 21 октября 2020 г. принят в состав атомного флота, «Сибирь» и «Урал» достраиваются на плаву, «Якутия» и «Чукотка» – строятся на стапеле Балтийского судостроительного завода.

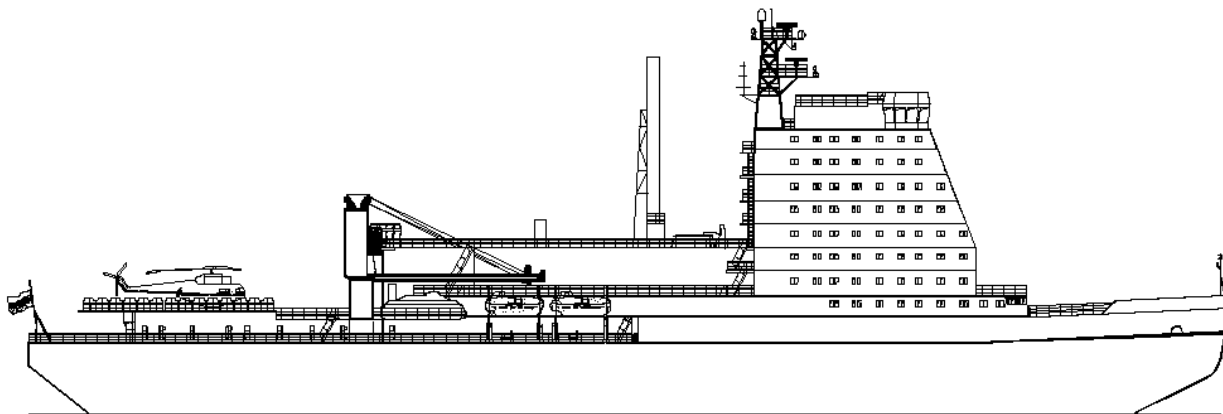


Рис. 9. Атомный ледокол «Арктика» проекта 22220

5. Модификации проекта 1052

Учитывая перспективы реализации в ближайшие десятилетия с непосредственным участием Российской Федерации международных проектов создания трансарктической магистрали межконтинентальных морских перевозок из

Атлантического бассейна в Тихоокеанский, с 2013 г. начаты работы по проектированию и подготовке строительства атомных ледоколов-лидеров мощностью до 110 МВт (типа ЛК-110Я; проект 10510, рис. 10), способных обеспечить плавание судов на традиционных, высокоширотных и приполюсных маршрутах Севморпути в круглогодичном навигационном цикле.



Рис. 10. Проектное изображение атомного ледокола-лидера типа ЛК-110Я

Ледокол проекта 22220 имеет двухреакторную энергетическую установку с основным источником пара от реакторной установки нового поколения РИТМ-200 мощностью 175 МВт, специально разработанную для этого судна. Технический проект атомного судна был разработан ЦКБ «Айсберг» в 2009 году. Двухсодочная конструкция судна позволяет использовать его как в водах арктических морей, так и в устьях полярных рек. РУ РИТМ-200 – интегрального типа, то есть активная зона и трубные системы парогенераторов объединены в одном

корпусе, что снижает вес и габариты РУ, и предотвращает выход радиоактивных продуктов в отсеки судна в случае аварии с нарушением герметичности первого контура. РУ интегрального типа применяется на российских судах впервые.

Ледокол будет работать в западном районе Арктики: в Баренцевом, Печорском и Карском морях, а также на более мелководных участках устья Енисея и районе Обской губы.

Основные технические характеристики ледоколов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики атомных ледоколов проектов 1052 различных модификаций, 10510, 10580 и 22220

Характеристики		<i>50 лет Победы</i>	<i>Таймыр</i>	<i>Арктика (II)</i>	<i>Лидер ЛК-110Я</i>
Индекс проекта		10521М	10580	22220	10510
Число судов в серии		1	2	5	проект
Дата принятия в эксплуатацию		12.03.2007	30.06.1989	21.10.2020	проект
Длина, м	по КВЛ	139,8	136,3	160	•
	габаритная	159,6	149,7	173,3	215,0
Ширина, м	по КВЛ	28,0	28,9	32,2	38,0
	габаритная	30,0	30,0	34,0	40,0
Высота борта, м		17,2	15,7	15,2	20,3
Осадка, м	по КВЛ	11,0	9,0	10,5	13,0
	мин. рабочая	–	–	8,55	11,0
Водоизмещение, т		25840	21100	33540	55600
Тип ЯЭУ		ОК-900А	КЛТ-40М	РИТМ-200	РИТМ-400
Мощность, МВт	РУ	2 × 171	155	2 × 175	2 × 315
	на валах	52,8	36,0	60,0	110,0
Число гребных винтов		3	3	3	3
Ледопроездимость, м		2,5	1,75	2,9	4,5
Скор. на чистой воде, уз		21,0	20,0	20,0	24,0
Число пассажиров, чел.		180	–	–	–

Одновременно со строительством новых атомных ледоколов Росатомфлот начал утилизацию атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь» (проекта 1052) и продолжил утилизацию судов атомно-технологического обслуживания.

В ближайшие годы начнется утилизация находящихся в отстое атомных ледоколов «Россия» и «Советский Союз», будут выведены из действия линейный ледокол «Ямал» и два мелкосидящих ледокола типа «Таймыр», вступят в строй универсальные атомные ледоколы проекта 22220. Последние смогут заменить пять выводимых до 2025 г. атомных ледоколов, в том числе три ледокола проекта 10521 («Россия», «Советский Союз», «Ямал»). Для обеспечения круглогодичной навигации на Северном морском пути, а также работ на шельфе (включая Восточный район Арктики и высокоширотные трассы СМП) предусматривается

строительство атомного ледокола-лидера мощностью на валах 110 – 130 МВт (концептуальный проект такого ледокола уже разработан) [5].

Проектируемый атомоход-лидер мощностью 110 МВт обеспечит проводки судов по высокоширотным маршрутам, которые в 1,5 раза короче прибрежных трасс Северного морского пути. «Лидер» также сможет обеспечивать проводку с коммерческой скоростью новых танкеров-газовозов в Обской губе и Беринговом проливе.

Ледокол-лидер разработан Крыловским государственным научным центром совместно с ЦКБ «Айсберг». Он спроектирован для круглогодичной проводки крупнотоннажных транспортных судов (дедвейтом более 100000 тонн и шириной более 50 м) на всем протяжении Северного морского пути с экономически эффективной скоростью (около 10 узлов) во льдах толщиной около 2 м. Сам ледокол сможет свободно перемещаться по Арктике,

преодолевая любые существующие льды (толщиной до 4,5 м). Все материалы и основное оборудование, необходимые для строительства ледокола, могут быть поставлены отечественными предприятиями. В проекте обеспечена унификация основного и вспомогательного оборудования со строящимся универсальным атомным ледоколом Арктика пр. 22220. Разработка технического проекта ледокола-лидера началась в 2016 г., что должно было обеспечить сдачу ледокола в эксплуатацию в 2024 г. (срок разработки технического проекта – 3 года). Однако пока только определен завод-строитель атомного ледокола-лидера, это новый дальневосточный судостроительный комплекс «Звезда», прошедший глубокую модернизацию оборудования. Новый атомный ледокол-лидер будет введен в эксплуатацию примерно во второй половине 2020-х годов.

Заключение

Трассы Северного морского пути пролегают на акваториях арктических морей и южной части Северного Ледовитого океана в пределах исключительной экономической зоны России в Арктике, которая простирается на 200 морских миль к северу от побережья и островов морей Российской Арктики. Помимо этого, Россия претендует на участок арктического морского шельфа площадью 1,2 млн. км² в районе хребта Ломоносова и поднятия Менделеева в Северном Ледовитом океане. Основную работу по сбору данных для обоснования внешней границы континентального шельфа также обеспечивают атомные ледоколы.

Официальными претендентами на ресурсы арктического шельфа и дна Северного Ледовитого

океана являются США, Канада, Дания, Норвегия и Исландия. Активный интерес к Арктике проявляют Германия, Япония, Индия и Китай. Многие из этих стран проводят политику пересмотра границ экономических зон в Арктике. На выполнение научных программ по изучению гидрометеорологического режима Арктики, геофизические и геологические исследования страны Европейского союза и США затрачивают ежегодно до 1 млрд. долларов США.

Характерно, что для целей производства научных исследований в Арктике привлекаются российские ледоколы и суда. Примером может служить рейс ледокола «Капитан Драницын» с экспедицией Университета Аляски в 2008 г.

В этих условиях Россия в целях обеспечения своих геополитических интересов должна постоянно поддерживать активное присутствие в этом регионе. Оно выражается в проведении научных исследований, разведке и добыче полезных ископаемых, обеспечении морских грузоперевозок с использованием ледоколов и специализированных ледокольно-транспортных судов.

В настоящее время Россия является мировым лидером в области применения атомного ледокольного флота для решения транспортных задач в морях Арктики и неарктических замерзающих морях. Для успешной конкуренции России необходимо не упускать этого лидерства и постоянно развивать и совершенствовать атомный ледокольный флот как ключевое звено инфраструктуры функционирования Северного морского пути.

Литература

1. Федеральный закон № 132-ФЗ от 28 июля 2012 года «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории северного морского пути».
2. Половинкин В.Н., Фомичев А.Б. Перспективные направления и проблемы развития Арктической транспортной системы Российской Федерации в XXI веке // Арктика: экология и экономика. 2012. № 3 (7). С.74-83.
3. Рукша В.В., Смирнов А.А., Головинский С.А. Атомный ледокольный флот России и перспективы развития Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2013. № 1 (9). С.78-83.
4. Слипенчук М.В. Национальный арктический транспортный коридор: проблемы и перспективы // Арктическое обозрение. Официальное издание Международного экспертного совета по сотрудничеству в Арктике. 2016. № 2. С.10-15.
5. Буянов С.И. Состояние и перспективы развития Арктической морской транспортной системы, включая арктические порты // V Международная конференция по развитию портов и судоходства и XIII Международная транспортная выставка «Транстек». Тезисы докладов. С.-Пб., 2016. С.65-68.
6. ПАО «Совкомфлот»: позитивные результаты на фоне слабого рынка // Морской флот. 2016. № 4. С.16-18.
7. Российская Арктика: Справочник для государственных служащих. - М., 2001. - 337с.
8. Рукша В.В., Белкин М.С., Смирнов А.А., Арутюнян В.Г. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы // Арктика: экология и экономика. 2015. № 4 (20). С.104-110.
9. Бордученко Ю.Л. Ледокольный флот России: монография / под научной ред. И.Г. Малыгина. - СПб.: ИПТ РАН, 2018. – 274 с.
10. Демьянченко В.Я., Макеев А.Н. Атомный ледокол «50 лет Победы» // Судостроение. 2008. № 1. С.13-19.

References

1. Federal'nyj zakon № 132-FZ ot 28 iyulya 2012 goda «O vnesenii izmenenij v ot del'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii v chasti gosudarstvennogo regulirovaniya to rgovogo moreplavaniya v akvatorii severnogo morskogo puti» [«On amendments to certain legislative acts of the Russian Federation in terms of state regulation of merchant shipping in the water area of the northern sea route»].

2. Polovinkin V.N., Fomichev A.B. Perspektivnye napravleniya i problemy razvitiya Arkticheskoy transportnoj sistemy Rossijskoj Federacii v XXI veke [Prospective directions and problems of the development of the Arctic transport system of the Russian Federation in the XXI century]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2012. № 3 (7). pp.74-83.
3. Ruksha V.V., Smirnov A.A., Golovinskij S.A. Atomnyj ledokol'nyj flot Rossii i perspektivy razvitiya Severnogo morskogo puti [Nuclear icebreaker fleet of Russia and prospects for the development of the Northern Sea Route]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2013. № 1 (9). pp.78-83.
4. Slipenchuk M.V. Nacional'nyj arkticheskij transportnyj koridor: problemy i perspektivy [National Arctic Transport Corridor: Problems and Prospects]. *Arkticheskoe obozrenie. Oficial'noe izdanie Mezhdunarodnogo ekspertnogo soвета po sotrudnichestvu v Arktike*. 2016. № 2. pp.10-15.
5. Buyanov S.I. Sostoyanie i perspektivy razvitiya Arkticheskoy morskoy transportnoj sistemy, vklyuchaya arkticheskie porty [State and development prospects of the Arctic marine transport system, including Arctic ports]. V *Mezhdunarodnaya konferenciya po razvitiyu portov i sudohodstva i XIII Mezhdunarodnaya transportnaya vystavka «Transtek». Tezisy dokladov. S.-Pb.*, 2016. pp.65-68.
6. PAO «Sovkomflot»: pozitivnye rezul'taty na fone slabogo rynka [PJSC Sovcomflot: positive results amid weak market]. *Morskoy flot*. 2016. № 4. pp.16-18.
7. Rossijskaya Arktika: Spravochnik dlya gosudarstvennyh sluzhashchih [Russian Arctic: A Handbook for Civil Servants]. M., 2001. 337p.
8. Ruksha V.V., Belkin M.S., Smirnov A.A., Arutyunyan V.G. Struktura i dinamika gruzoperevozok po Severnomu morskomu puti: istoriya, nastoyashchee i perspektivy [The structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: history, present and prospects]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2015. № 4 (20). pp.104-110.
9. Borduchenko YU.L. Ledokol'nyj flot Rossii [Russian icebreaker fleet]: monografiya / pod nauchnoj red. I.G. Malygina. - SPb.: IPT RAN, 2018. – 274 p.
10. Dem'yanchenko V.YA., Makeev A.N. Atomnyj ledokol «50 let Pobedy» [Nuclear icebreaker "50 years of Victory"]. *Sudostroenie*. 2008. № 1. Pp.13-19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Леонидович Бордученко, кандидат исторических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: e-mail: yu-borduchenko@yandex.ru

Игорь Геннадьевич Малыгин, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: malygin_com@mail.ru

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Владимир Алексеевич Аксенов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», 125315, Москва, 3й Балтийский пер., д. 3, стр. 1, e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Yuri L Borduchenko, senior lecturer, Ph.D. (History), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: yu-borduchenko@yandex.ru

Igor G. Malygin, professor, Dr. Sci. (Eng), CEO of the Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of the Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Moskovskiy prospect 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: malygin_com@mail.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Vladimir A. Aksenov, professor, Dr.Sci. (Eng), head chair of «Technosphere security» the Russian university of transport (MIIT), p.1, 3rd Baltiyskiy per., Moscow, 125315, Russian Federation, e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021

Принята к публикации: 15.04.2021

УДК 629.5.083.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.002>

Рационализация организации новых производств и технологических процессов на судоремонтных предприятиях ВМФ в годы Великой Отечественной войны

В.Н. Половинкин¹ e-mail: vnpolo@yandex.ru, С.В. Федулов² e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru, Д.Н. Соловьев³ e-mail: botanik-s@yandex.ru, Н.Н. Мизиркина² e-mail: nmizirkina@mail.ru

¹ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, ³Михайловская военная артиллерийская академия

Аннотация. В годы Великой Отечественной войны руководством НКВМФ уделялось большое внимание рационализаторской работе на флоте. Что принесло ощутимые результаты в поддержании боевой готовности кораблей и частей ВМФ, в совершенствовании техники и средств вооружения, но прежде всего стало серьезным стимулом в развитии творческой инициативы командиров и краснофлотцев.

Не остались без внимания и такие флотские структуры как судоремонтные предприятия (заводы и мастерские флотов и флотилий). В 1943–1944 годы Техническое управление НКВМФ, с целью обобщения опыта рационализаторской работы судоремонта обратилось к руководителям этих предприятий с требованием представить для анализа и обобщения наиболее важные и значимые рационализаторские предложения, направленные на развитие производства и совершенствование технологических процессов. В 1944 году, на основе обобщенного опыта рационализаторской работы на судоремонтных предприятиях ВМФ Техническим управлением НКВМФ был издан сборник «Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну». В данном документе, с целью распространения и использования, были представлены наиболее интересные и перспективные изобретения и рационализаторские предложения, разработанные и реализованные на судоремонтных предприятиях по 1944 год.

Ключевые слова: Техническое управление, судоремонтные предприятия, производство, технологический процесс, судоремонт, Кронштадтский морской завод, Мурманский судоремонтный завод.

Rationalization of the organization of new industries and technological processes at the ship-repair enterprises of the Navy during the Great Patriotic War

Valerij N. Polovinkin¹ e-mail: vnpolo@yandex.ru, Sergey V. Fedulov² e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru, Dmitry N. Soloviev³ e-mail: botanik-s@yandex.ru, Nataliya N. Mizirkina² e-mail: nmizirkina@mail.ru

¹Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation, ²Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation, ³Mikhailovskaya Military Artillery Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. During the Great Patriotic War, the leadership of the NKVMF paid great attention to rationalization work in the fleet. This brought tangible results in maintaining the combat readiness of ships and units of the Navy, in improving equipment and weapons, but above all it became a serious incentive in the development of the creative initiative of commanders and Red Navy men.

Such naval structures as ship repair enterprises (factories and workshops of fleets and flotillas) did not go unnoticed either. In 1943-1944, the NKVMF Technical Directorate, in order to summarize the experience of the rationalization work of ship repair, turned to the heads of these enterprises with the requirement to submit for analysis and generalization the most important and significant rationalization proposals aimed at the development of production and the improvement of technological processes. In 1944, on the basis of the generalized experience of rationalization work at the naval shipyards, the NKVMF Technical Directorate published the collection "Experience of ship repair and the development of new types of production at naval shipyards in the Patriotic War." In this document, in order to disseminate and use it, the most interesting and promising inventions and rationalization proposals developed and implemented at shipyards until 1944 were presented.

Key words: Technical management, ship repair enterprises, production, technological process, ship repair, Kronstadt marine plant, Murmansk ship repair plant.

Введение

Накануне Великой Отечественной войны, в 1938 году в Советском Союзе была принята «Большая программа военного кораблестроения», для реализации которой были отпущены огромные средства, направляемые на новое судостроение. В свою очередь, на развитие судоремонтной базы не доставало ни времени, ни средств.

С началом и в ходе Великой Отечественной войны проблема военного судоремонта стала очень остро. Корабли нуждались в срочном ремонте и восстановлении. Судостроительные, судоремонтные предприятия на Краснознаменном Балтийском флоте в первые месяцы войны были захвачены

противником, кроме Кронштадтского морского завода, который находился в блокаде, при этом, весь Краснознаменный Балтийский флот находился в Кронштадте и Ленинграде. Судоремонтные предприятия Черноморского флота, хотя и не сразу, но были захвачены немецко-фашистскими захватчиками. Тихоокеанские судоремонтные предприятия находились вдалеке от боевых действий. [1]

На Северном флоте ведущим судоремонтным предприятием являлся Мурманский судоремонтный завод, находившийся в стадии строительства. Срок вступления в строй которого был намечен на конец 1942 года. Поэтому с началом войны ни один из цехов не имел 100% готовности. Отсутствовали

такие объекты, как столовая, и главное – ТЭЦ, поэтому отопление для предприятия и пар производили временная котельная, оборудованная в помещении пустующего складского помещения и пять паровозов. [2]

В сложившихся условиях важную роль сыграла сложившаяся в мирное время система массового изобретательского и рационализаторского движения, в том числе и на флоте. В марте 1941 года в составе Наркомата ВМФ был сформирован Отдел изобретений, который организовывал совместно Техническим управлением (ТУ) НКВМФ изобретательскую и рационализаторскую работу. [3]

В 1944 году ТУ НКВМФ был издан сборник «Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну». В нем были обобщены наиболее интересные полезные рационализаторские предложения судоремонтных предприятий. В нем отмечалось, что почти на каждом, даже небольшом судоремонтном предприятии имеется целый ряд рационализаторских предложений производственного характера, однако ТУ НКВМФ интересовали только те, которые могли быть использованы на других предприятиях. [4]

1. Рационализация судоремонта в годы великой отечественной войны на судоремонтных предприятиях

Некоторые из рационализаторских предложений следует рассмотреть более подробно. И первое из них – аварийное докование крейсера «Максим Горький». В 1941 году у крейсера «Максим Горький» взрывом мины была оторвана носовая часть по 49 шпангоут. Встал вопрос о восстановлении носовой части корабля. Носовую часть можно было восстановить в доке или построить ее отдельно и присоединить к кормовой части корабля опять же в доке.

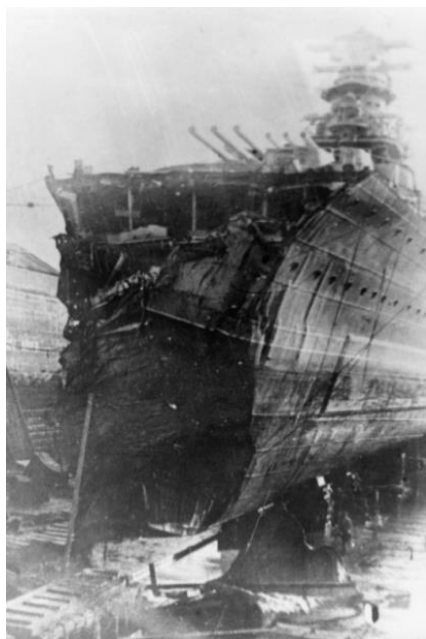


Рис. 1. Повреждение крейсера «Максим Горький»

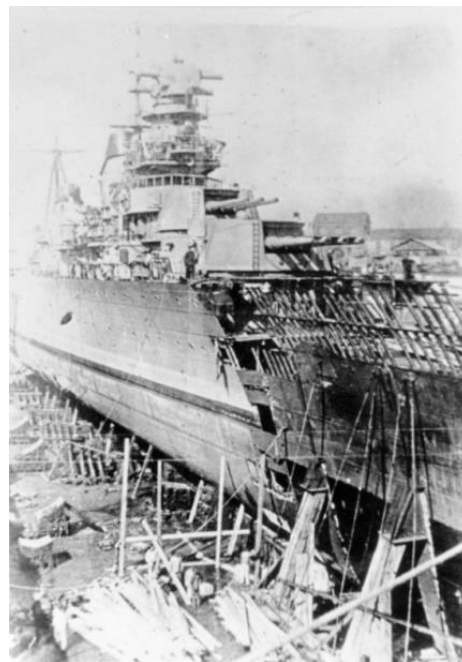


Рис. 2. Крейсер «Максим Горький» в доке

Был принят вариант отдельной постройки носовой части на заводе №189, что и было выполнено. Носовая часть корабля строилась на стапеле завода №189, спуск на воду происходил по спусковым дорожкам. Носовая часть корабля была по длине разделена на три отсека. Первый отсек имел диаметр 150 мм. на высоте около 1 м. от килля, через это отверстие отсек был заполнен водой. Второй отсек был сухой. Третий отсек был загружен твердым балластом. Это было сделано с целью увеличения остойчивости. таким образом, первый отсек заполнялся водой, третий – твердым балластом, и кроме этого были сняты верхние плиты обшивки. Принятые меры позволили получить плечо остойчивости 20 см. В таком виде носовая часть корабля была прибуксирована в Кронштадт для соединения с кормовой частью в доке.

Вариант докования, предложенный представителями завода №189 помимо удлинения сроков работ, не давал точности соединения частей корабля. Конструкторским отделом Кронштадтского морского завода (КМЗ) был предложен другой способ докования обеих частей корабля. Точная подгонка частей корабля осуществлялась в доке, наполненном водой, а до этого в нем устанавливались специальные полозья и приспособления для регулирования точности стыковки носовой и кормовой частей. При этом, водолазы проверили полозья на отсутствие посторонних предметов. С откачкой воды из дока, посадка частей корабля на полозья прошла успешно. Носовая часть была подогнана к кормовой до совмещения основных линий корабля и только после этого приступили к корпусным работам. Через девять дней корабль был выведен из дока на ходовые испытания. [5]

Следующим оригинальным технологическим предложением являлась докование канонерской лодки «Кама».

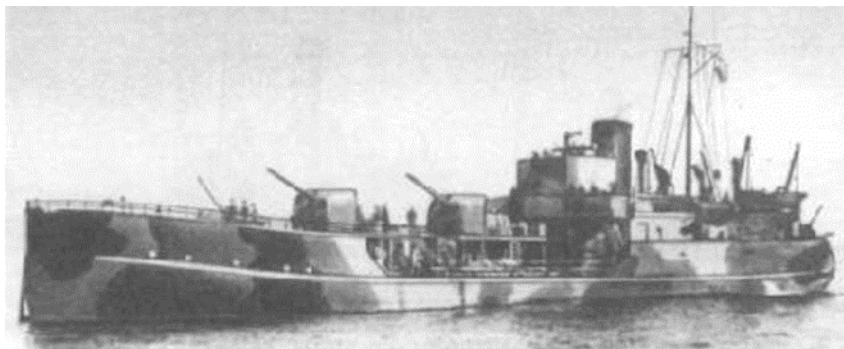


Рис. 3. Канонерская лодка «Кама»

19 мая 1942 года канонерская лодка «Кама» должна была доковаться в доке «Трех эсминцев» для смены винтов. По условиям ремонта, корабль следовало вводить в док, однако там уже находились в ремонте ряд кораблей. В связи с этим, по нормам докования необходимо было провести следующие операции:

1. Вывести из дока все корабли.
2. Осушить док.
3. Разобрать клетки, мешающие постановке корабля, назначенного к ремонту.
4. Набрать клетки под докуемый корабль.

Этот объем работ удалось избежать благодаря рационализаторскому предложению инженер-капитана 3 ранга П.В. Яковлева, суть которого заключалась в доковании канонерской лодки «Кама» «по одной воде». Главной особенностью данного рационализаторского предложения являлось то, что подготовительные работы для докования корабля осуществлялись заранее, а именно набор клеток готовился во время ремонта других кораблей, при этом учитывалась архитектура канонерской лодки «Кама». Выбранным местом в доке для постановки канонерской лодки «Кама» было место ремонта тральщика «ТЩ-51». Не разбирая его клеток и не прерывая его ремонта, под руководством П.В. Яковлева, были подогнаны его же клетки для канонерской лодки «Кама». После проведенных с клетками работ, докование проводилось на «одной воде», то есть при выходе из доков отремонтированных кораблей и по той же воде, были заведены и придокованы следующие, в том числе и канонерская лодка «Кама». В результате проведенных мероприятий канонерская лодка «Кама» была придокована на три дня раньше срока. Следует отметить, что метод «одной воды», рекомендованный инженер-капитаном 3 ранга П.В. Яковлевым, на КМЗ начал применяться постоянно. [6]

Немаловажный интерес вызывает ремонт Мурманским судоремонтным заводом английского эсминца «Кассандра» [7], на котором следует остановиться более подробно.

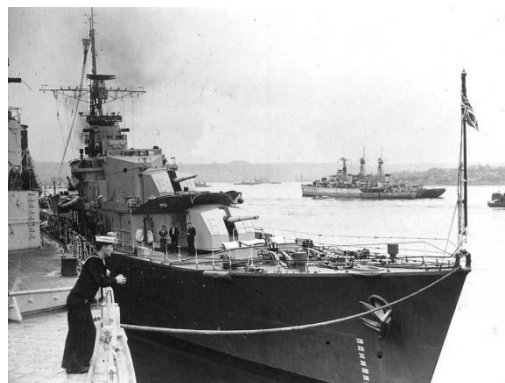


Рис. 4. Английский эсминец «Кассандра»

Эсминец английского флота «Кассандра», водоизмещением 2.400 тн. при длине 111 м окончен постройкой в 1944 году и летом того же года, после государственных сдаточных испытаний в Глазго вступил в состав действующего флота. После благополучного рейса в Мурманск, вместе с двумя фрегатами возвращался в Англию.

В середине декабря 1944 года на расстоянии 350 миль от берега ночью корабль поучил попадание торпедой в носовую часть корпуса, примерно в 20 метрах от форштевня. Взрывом, 26 метров носовой оконечности корабля было оторвано и моментально затонуло вместе с личным составом (матросами), находящимся в кубриках.

Поперечная переборка на 35 шпангоуте, отделявшая кубрик от офицерских кают незначительно деформировалась, но водонепроницаемость не потеряла. Действие взрыва на весь корпус корабля привело к явлению аналогичному с танкером «Бритиш Говелер» (ранее ремонтируемом на заводе). Выразившееся в том, что на палубе, на расстоянии около 1/3 длины корабля от кормового среза, в районе торпедных аппаратов, в листах настила появились гофры и трещины.

Сразу же, после торпедной атаки, личный состав бросился к уцелевшей 35 переборке и началась работа по расклинке ее деревянными брусками.

Делалось это столь усердно, что переборка в некоторых местах подалась наружу и начала пропускать воду. Вызвав на помощь спасательные буксиры, в охранении двух фрегатов, эсминцев задним ходом направились в Мурманск. Через четверо суток тяжелого похода, двигаясь в среднем 4-х узловым ходом он пришел к заводу и пришвартовался у стенки. [8]

Заводу было поручено изготовить нос эсминца для того, чтобы корабль своим ходом, в составе каравана, со скоростью 11–12 узлов мог дойти до своей базы в Англию, где сразу же после получения сведений о размерах повреждения, приступили к изготовлению оторванной носовой оконечности.

На Мурманском судоремонтном заводе временная носовая накладка была запроектирована общей длиной 12 метров, что диктовалось необходимостью достаточно плавных ватерлиний. В целях упрочнения и ускорения изготовления этой наделки шпангоутам была придана ломанная форма с постепенным переходом к плавным очертаниям на месте притыкания к корпусу корабля. Прочность обеспечивалась соответствующими толщинами обшивки, профилем шпангоутов, стрингерами и раскосами, поставленными внутри корпуса.

На верхней палубе (палуба полубака) к разрушенной части надстройки, с целью устранения разрушающего действия встречной волны был приделан волнорез, являющийся как бы продолжением надстройки. Якорное устройство, согласно требованиям английского командования, было спроектировано из расчета отдачи якоря только один раз, поэтому все якорное оборудование было размещено на верхней палубе.

После разбивки нового носа корабля на плазе, в цехе началась его сборка. Для удобства перевозки, нос был разделен на 8 секций, для чего поперечный набор резался на стрингерах и соединялся затем с помощью стальных книц. Такой метод, во-первых, сократил до минимума срок стоянки корабля в доке. Во-вторых, значительно облегчил условия работы сборщиков и сварщиков, работавших в закрытом помещении. В-третьих, в значительной мере уменьшил количество внутризаводских перевозок. Все это привело к ускорению и удешевлению общего объема работ. В районе гофр и трещин кормовой части верхней палубы были приварены дублирующие листы.

По окончании ремонтных работ эсmineц вышел на ходовые испытания и показал весьма неплохие результаты. Так, например, при скорости 20 узлов, если считать по развитой мощности турбин, он потерял 1,5 узла, а при 15-ти узловой скорости, потеря составила 0,3 узла. Таким образом, при скорости 15 узлов увеличение остаточного сопротивления почти полностью компенсировалось уменьшением сопротивления трения.

Никаких явлений вибрации или ухудшения других мореходных качеств на данных скоростях обнаружено не было. Диаметр циркуляции при скорости 18 узлов составил, судя по следу от винтов, 2–2,5 длины корабля. Корабль благополучно дошел без всяких повреждений до берегов Англии [9].

Приведенные примеры свидетельствуют о той многоплановой и крупномасштабной рационализаторской работе, которая была развернута на судостроительных предприятиях

ВМФ. Поэтому изданный в 1944 году Техническим управлением НКВМФ «Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну» имел первостепенное значение.

2. Рационализация организации новых производств на судоремонтных предприятиях ВМФ в годы Великой Отечественной войны

В первую очередь Техническим управлением НКВМФ было уделено внимание рационализаторской работе по организации новых производств к которой относились:

Изготовление винтов для всех типов торпедных катеров и морских охотников (Из опыта предприятий НКВМФ и НКСП) Великая Отечественная война в значительной степени повлияла на условия производства в судоремонтных предприятиях. В частности, появилась необходимость организации новых производств по изготовлению запасных частей и оборудования со сложным процессом производства. Изготовление гребных винтов для быстроходных катеров производилось заводами Наркомата судостроительной промышленности (НКСП). На них была разработана технология отливки винтов путем шаблонной формовки с последующей ручной обработкой. Основным недостатком этого вида производства являлась значительная механическая обработка, так как отливка заготовок производилась с большими припусками.

При необходимости организации производства винтов на судоремонтных предприятиях ВМФ, первоначальные образцы изготавливались в соответствии с технологическими процессами заводов НКСП. В дальнейшем ими была разработана своя технология и поставлены опыты отливок винтов по стержням с приливами по обводам лопастей. Был изучен опыт центробежной отливки. Механизировалась обработка лопастей винтов. В 1944 году велись работы по дальнейшему усовершенствованию и улучшению технологии изготовления винтов (центробежной отливкой, отливкой винтов в кокилях и с обработкой лопастей по копиру, а также обработкой на токарных станках по шагу винта). В описании данного опыта показаны: отливка заготовок гребных винтов (отливка в стержнях, центробежная отливка гребных винтов (принцип и работа центробежной машины, режим заливки на центробежной машине, формовка гребных винтов под центробежную заливку)); порядок сборки формы и установки ее на машину; обработка заготовок; механическая обработка.

Ручная обработка лопастей представляла собой сложную тяжелую и ответственную работу и требовало 200–250 чел./час. работы высококвалифицированного слесаря-винторуба. Затруднения в рабочей силе поставили на повестку дня разработку мероприятий по замене ручной работы механической. При этом было разработано и частично использовано несколько приспособлений, преследующих собой одну и ту же цель — механизировать обработку лопастей гребных винтов. [10]

Опыт мастерской Тихоокеанского флота (Предложение тов. Хвостова). В мастерской ТОФ по предложению т. Хвостова был применен способ

полумеханической обработки лопастей винта. Обработка производилась фрезой, приводимой в движение от специальной электродрели. Приспособление разработано из расчета обработки лопастей на токарно-винторезном станке фрезерованием и основано на принципе нарезки резьб на станке по заданному шагу с соответствующим подбором сменных шестерен.

Обработка винтов на таком приспособлении давала экономию материалов, инструмента, сокращала расход воздуха, так как не требовалось пневматической обрубки лопастей, упрощала процесс разметки гребных винтов и позволяла значительно сократить расход рабочей силы при повышении точности обработки. [11]

Аналогично были раскрыты:

- Обработка лопастей винтов по копиру (Оргсудпром НКСП).

- Обработка лопастей гребных винтов на токарном станке (Из опыта завода НКСП).

- Обработка лопастей гребных винтов на зубофрезерном станке (Из опыта завода НКСП). [12]

Изготовление токарно-винторезных станков (Из опыта Механического завода Каспийской военной флотилии). Механический завод Каспийской военной флотилии, имея задания по освоению новой продукции, требующей в основном механической обработки деталей, начал прорабатывать вопрос об увеличении мощности модернизацией старого станочного парка и пополнением его новыми станками с изготовлением их на заводе своими силами. Модернизация старого станочного парка в условиях судоремонтного предприятия, а следовательно, подавляющего большинства индивидуальной, и только в отдельных случаях мелкосерийной станочной продукции, требовало больших диапазонов режимов резания, что могло отразиться на росте станочного парка. Оставалось изготовление токарно-винторезных станков наиболее необходимых размеров своими силами.

В цехе, главным механиком было решено организовать постройку станков с высотой центров до 200 мм и расстоянием между центрами до 1500 мм. Наиболее подходящим для этого, был станок типа МТ-3. Этот тип станков строился заводом Азстанкострой № 2 в г. Баку, поэтому чертежи, технические условия, нормативы, технологический процесс, а главное, опыт работы мог быть использован, что значительно сокращало период подготовительных работ.

Одним из важных моментов в станкостроении являлось применение литых деталей с установившейся структурой металла, для чего деталь должна получать механическую обработку по истечении значительного срока после отливки. Деталь должна была пройти процесс старения. Были изготовлены необходимые калибры, шаблоны и приспособления. Хотя литейный цех завода мог отлить такие части станков, как станины, коробки скоростей, передние и задние бабки, эти детали были приобретены с завода № 2, где они пролежали более 2 лет. После подбора всех материалов и проведения подготовительных работ, а также разработки технологических карт применительно к оборудованию завода, приступили к изготовлению первого образца станка. Тщательная подготовка

позволила механическому заводу изготовить станок с необходимой точностью.

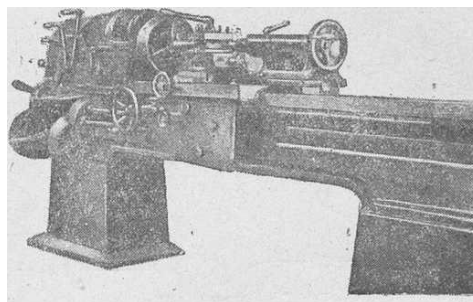


Рис. 5. Токарно-винторезный станок

Испытания показали, что качество станка ничем не отличается от станков такой же марки, построенных станкостроительным заводом. Отклонения от требований ГОСТ не было. Эксплуатация показала, что станок работает хорошо, и, поэтому был прочно внедрен в судоремонт. Стоимость первого станка составила 17 000 руб., второго 16 000 руб., а в дальнейшем каждый станок стоил не более 14 000 руб. Опыт постройки токарных станков показал, что при достаточно внимательной подготовке работ, точной обработке каждой детали по калибрам и шаблонам, а также при качественной сборке токарно-винторезные станки могли быть изготовлены на судоремонтном предприятии своими силами. [13]

Изготовление переносных трюмных турбонасосов ТТН-4. Портативные турбинные насосы, работающие от пожарной магистрали корабля, применялись для откачки воды из поврежденных отсеков корабля. Переносные «турбинки» типа Ильина имели весьма сложную конструкцию, что затрудняло их изготовление и эксплуатацию. Более простая конструкция была разработана заводом №3 им. Калинина.

Производительность насоса была следующей:

- а) при 10 атм. давления — не менее 45 м³/час., расход рабочей воды—16 м³/час.;

- б) при 13 атм.— 60 м³/час., расход рабочей воды 20 м³/час.;

- в) при 16 атм. — 70 м³/час., расход рабочей воды 21 м³/час.

Число оборотов — 4000—5000 в мин. [14]

Фрезеровка лопаток рабочих колес переносных трюмных турбонасосов ТТН-4 (Предложение инженер-капитана 3 ранга Недосеева и мастера Антонова). Опыт постройки переносных трюмных турбонасосов ТТН-4 показал, что наиболее сложная и трудоемкая деталь — это обработка лопастей в рабочих колесах направляющих лопаток. После проведения конструирования и испытания ряда приспособлений для механической обработки лопаток рабочих колес было принято к изготовлению приспособление, предложенное инженер-капитаном 3 ранга Недосеевым и мастером Антоновым, которое удовлетворяло поставленным требованиям.

Опыт постройки трюмных турбонасосов ТТН-4 показал, что даже при значительной сложности механизм может быть выполнен на предприятии при условии проведения соответствующих подготовительных работ — заготовки шаблонов, калибров и т. д., а главное — при точном выполнении

всех требований технических условий на постройку машины. [15]

Изготовление воздушно-пенных огнетушителей РО-1. (Из опыта судоремонтных мастерских). Тушение пламени легковоспламеняющихся жидкостей (нефть, бензин, керосин) и пожаров деревянных конструкций было очень затруднено при применении общепринятых способов пожаротушения. Тушение пламени с помощью огнетушителя могло быть с успехом применено только для малых очагов пожара (из-за кратковременности их действия и короткой струи). Для тушения горящих легковоспламеняющихся материалов на больших пространствах и в большем объеме требовались приборы с продолжительным и дальним действием пенной струи. Наиболее удовлетворяющие таким требованиям — воздушно-пенные огнетушители.

Работа воздушно-пенных стволов состояла в том, что пена, покрывая толстым слоем горящую жидкость, из-за отсутствия притока воздуха способствовала быстрейшему тушению пожара. При горении в цистернах, трюмах и баках употреблялись пеносливывы. Комплект ранцевого огнетушителя РО-1 состоял из воздушно-пенного ствола и ранца. Ранцевый огнетушитель работал следующим образом: боец надевал на спину ранец, который держался на лямках. В ранец предварительно заливался пенообразователь.

При наличии пожароопасных помещений, отсеков или значительных количеств легковоспламеняющихся жидкостей рекомендовалось иметь соответствующей мощности средства пожаротушения. При этом следовало предлагалось устанавливать воздушно-пенные огнетушители РО-1 с продолжительным действием, для чего необходимо иметь соответствующее количество пенообразователя.

В котельных помещениях, машинных отделениях, в отделениях артиллерийских погребов и т.д. из-за малогабаритности и насыщенности механизмов предлагалось установить для пенообразователя бачки емкостью 80—100 л. Ранцевые огнетушители в этих помещениях всегда должны быть включены в пожарную или водную магистраль и готовы к действию. Установка бачка и соединение с пеностволом осуществлялись по разработанной рационализаторами схеме. Количество воздушно-пенных стволов требовалось устанавливать из расчета производительности ствола 2,5—3 м³/мин. или на 30—40 м² площади помещения. При этом время тушения составляло 3—4 мин., а расчетный слой пены 50—60 см.

Способ изготовления РО-1 и приготовления пенообразователя не представлял особой сложности, и легко мог быть выполнен в условиях судоремонтных мастерских. [16]

Химическое восстановление напильников. (Из опыта судоремонтных мастерских). В ходе работ, было установлено, что сработавшие напильники могли с успехом продолжать эксплуатироваться после соответствующей обработки — химического восстановления. Сущность химического восстановления напильников состояла в том, что сработавшийся, промытый напильник подвергается обработке серной и азотной кислотой, которые, воздействуя на зубья напильника, придавали им

необходимую режущую способность. Восстановление напильников производилось по следующему технологическому процессу: отбраковка; очистка; восстановление в ванне с кислотой; очистка и нейтрализация.

Вся операция восстановления сработавшихся напильников была несложной и могла быть выполнена малоквалифицированными рабочими. [17]

Холодная резка металла. (Из опыта судоремонтных мастерских). Затруднения в обеспечении слесарей ножовочными полотнами значительно сокращали производительность труда при выполнении многих видов работ. Холодная резка металла и изготовление необходимого инструмента для производства этих работ подверглись на ряде предприятий подробному изучению. Наиболее удовлетворительное решение получил этот вопрос по двум направлениям: резка металла дисковыми пилами и изготовление ножовочных полотен.

Изготовление ножовочных полотен было осуществлено несколькими способами на различных судоремонтных мастерских, но во всех случаях было идентичное решение — Судоремонтной мастерской Технического отдела (ТО) Беломорской военной флотилии (БВФ) и материалы, присланные ТО Тихоокеанского флота (ТОФ) (предложение старшего краснофлотца Бурлакова), имели аналогичные решения. Полотна изготавливались из листового железа, нарезались зубья, разводились, после чего полотна получали соответствующую термическую обработку. Термически обработанные ножовочные полотна проверялись, отбраковывались, смазывались маслом и передавались в кладовую.

Опыт показал, что ножовочные полотна, изготовленные из листового железа, работали вполне удовлетворительно. [18]

Станок для резки металла (Предложение инженера М.С. Иофа. Механический завод Каспийской военной флотилии). Резка труб и различного профильного железа производилась обычно слесарными пилами, труборезами, механическими пилами или производилась рубка зубильями. Все эти методы требовали большой затраты рабочего времени. Применение механических пил для резки металла не всегда удовлетворяли нужды цехов и к тому же требовались ножовочные полотна, которые, как показал опыт, часто ломались.

В промышленности часто употреблялись специальные станки для резки дисковыми пилами, но на судоремонтных предприятиях они получили малое применение. Опыт механического завода Каспийской военной флотилии показал, что дисковая пила для резки металла может быть с успехом применена при условии, что станок прост по конструкции и уходу и дает высокую производительность.

Станок состоял из станины сварной конструкции, двух шарикоподшипников, салазок для подачи нарезаемого материала и режущего диска. Станина станка была сварена из углового железа и листовой стали. К станине болтами прикреплялось два подшипника, в которых находился рабочий вал с диском. Режущий диск изготавливается из листовой стали толщиной 3 мм.

Диск не должен был иметь трещин, выемок и других механических повреждений.

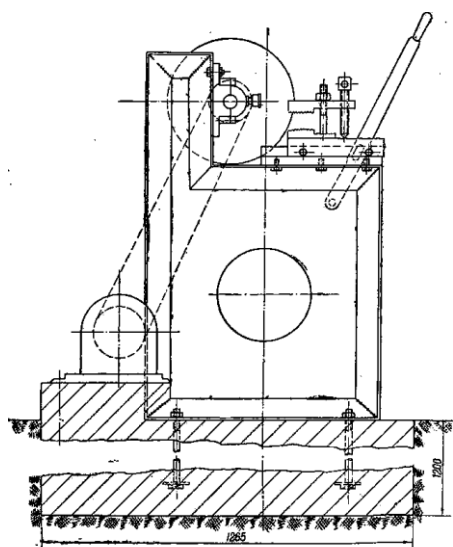


Рис. 6. Станок для резки металла дисковой пилой

От применения такого станка механический завод получал экономию в сумме около 10 000 руб. в год. [19]

Таким образом, рационализаторская работа по организации новых производств была направлена на: во-первых, механизацию труда. Во-вторых, сокращение расхода рабочей силы при повышении точности обработки изделий. В-третьих, модернизации старого станочного парка. В-четвертых, упрощение выпускаемой продукции, при этом не снижая ее качества. В-пятых, экономию средств, сырья и ресурсов.

3. Рационализация новых технологических процессов на судоремонтных предприятиях ВМФ в годы Великой Отечественной войны

Еще одним из направлений рационализаторской работы обобщенным Техническим управлением НКВМФ являлось совершенствование технологических процессов судоремонтных работ. К наиболее интересным относились такие рационализаторские предложения, как:

Ремонт электромашин, залитых морской водой (Из опыта Судоремонтной мастерской №4 Технического отдела Черноморского флота). Восстановление изоляции электрических машин, бывших в морской воде, по своему характеру отличался от сушки отсыревшей обмотки машин, просто замоченных пресной водой. Одна сушка изоляции машин, бывших в морской воде, обычно не давала результатов, так как в мелких щелях и на поверхности обмоток образовывались соляные проводящие мостики, снижающие изоляцию машин.

Раньше электродвигатель, побывавший в морской воде, подвергался полной разборке, после чего все детали промывались в пресной воде, а затем сушились и поступали на сборку. Миканитовые прокладки менялись новыми.

Новый технологический процесс предусматривал выполнение работ, обеспечивающих полное восстановление машины до требуемых технических норм при минимальной затрате рабочей силы и

материалов. Данный способ заключался в том, что снятые и очищенные электромагниты (сердечники с обмоткой) подвергались вывариванию в горячей воде (температура 60°C) пресной проточной воде в течение 10 часов. Далее сушились в калориферной электропечи с вытяжной вентиляцией при температуре 125–130°C в течение 16–18 часов, до достижения установившейся изоляции в горячем состоянии не ниже 20–30 мегом. После сушки в печи электромагниты целиком погружались в горячем состоянии (прямо из печи) в ванну с жидким изоляционным пропиточным лаком, где держались до прекращения выделения пузырьков воздуха. После этого, они вновь погружались в электропечь, где сушились в течение 10–12 часов при температуре 110–115°C до достижения установившейся изоляции в горячем состоянии не ниже 20–30 мегом. После этого электромагниты покрывались покровным изоляционным лаком (№462) и вновь загружались в электропечь, где сушились в течение 8–10 часов при температуре 90–100°C до получения сухой твердой корки лака. Изоляция обмотки якорей электромашин, залитых морской водой, восстанавливались аналогичным образом. Данный метод был проверен на практике, при этом получены хорошие результаты. Поэтому он был рекомендован к использованию на судоремонтных предприятиях. [20]

Наплавка вкладышей вместо перезаливки. Общепринятый способ ремонта подшипников состоял в том, что баббит выплавлялся, вкладыш лудился и производилась заливка новым баббитом. Такой способ работы требовал затраты труда медников, расхода дефицитного материала и удорожания стоимости ремонта машины.

Во многих случаях баббит подшипников по своему состоянию был вполне хорош и имел только один дефект в том, что верхняя его часть, соприкасающаяся с валом, срабатывалась. Если вкладыши подшипников имели небольшую сработку, которая все же не допускала дальнейшей их эксплуатации, а белый материал хорошо держался на корпусе, то они могли быть отремонтированы путем наплавки белого металла вместо перенарезки.

Опыт показал, что такой способ давал большее сокращение затраты рабочей силы и значительно сокращала расход баббита. [21]

Очистка внутренних поверхностей труб с помощью пескоструйного аппарата. (Из опыта судоремонтных мастерских). В случае необходимости тщательной очистки внутренней поверхности труб, в соответствии с технологическими условиями ремонта, рекомендовалось применять следующий способ, проверенный практикой судоремонта. Пескоструйный аппарат оборудовался длинным гибким шлангом с металлической броней. На конец шланга укреплялось нормальное сопло пескоструйного аппарата, укороченное на 10 мм. Сопло вводилось в трубу, а с противоположной стороны вставлялся стержень на штанге по длине трубы. Диаметр стержня был несколько меньше внутреннего сечения трубы. Стержень служил для направления потока песка на стенку трубы. Сопло и направляющий стержень двигались по трубе по ходу очистки. Такой способ очистки давал безукоризненно чистую поверхность с малой затратой рабочего времени. [22]

Гибка углового железа на вальцах. (Из опыта судоремонта). Производственная практика показала, что гибочные вальцы корпусно-котельных цехов могли быть использованы в более широких масштабах, а не только для гибки листов. На гибочных вальцах можно было производить следующие работы: гибку листов, валковку секций топок, гибку угольников, резку листов (толщиной в зависимости от мощности валков), как роликовыми ножницами, и т.д. Мастерские Северного флота произвели опыт выкатки колец из угольника 75X75X8 мм. при диаметре кольца 2,7 м. Обычно такие работы производились горячим способом.

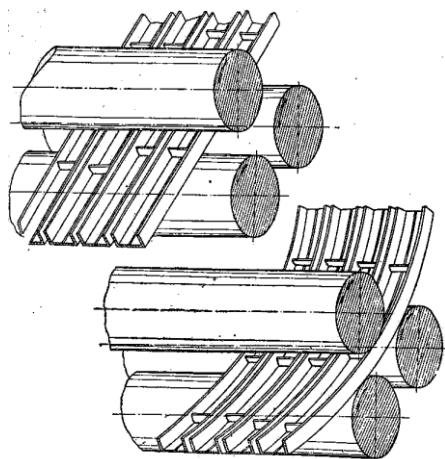


Рис. 7. Выгибка углового железа на валках

Использование гибочных вальцев для выполнения различных работ по обработке железа в холодном состоянии значительно снижало расход рабочей силы по горячим работам и повышало коэффициент использования оборудования. [23]

Экономия цветных металлов. Работа в условиях Великой Отечественной войны требовала от каждого предприятия максимальной экономии при расходовании остродефицитных цветных металлов. Баббит, олово, медь и другие дорогостоящие цветные металлы являлись большой статьей расхода при судоремонте, поэтому замена их менее дефицитными и экономное расходование являлись первостепенной задачей производственников. Замена баббита «Б-83» другими более бедными оловом баббитами, применение безоловянных бронз, цинково-алюминиевых сплавов, наплавка баббита вместо перезаливки, заливка подшипников в стальных формах – все эти вопросы преследовали одну цель – экономию цветных материалов.

Примерами рационализаторских мероприятий, проведенных на судоремонтных предприятиях по экономии цветных металлов являлись:

- создание и использование приспособления для заливки мотылевых подшипников (получалась экономия не только в сохранении белого металла, но и уменьшалась загрузка станочного парка);

- создание и использование приспособления для заливки коренных подшипников двигателей «ГАЗ» (использование данного метода: устраняло две сложные операции – разметку подшипников под расточку и саму расточку; давало экономии большого количества цветного металла – около 3 кг. на двигатель; давало экономию до 35 чел./час. по каждой машине). [24]

Ремонт бачков аккумуляторных батарей. (Из опыта Судоремонтной мастерской Северного флота). Стартерные аккумуляторные батареи часто поступали в ремонт из-за течи бачков при вполне удовлетворительном состоянии пластин. Весь ремонт таких батарей сводился к смене бачков, причем старые бачки выбрасывались. Осмотрами устанавливалось, что причиной течи являлось наличие трещин в деревянных футлярах батарей.

Был разработан способ исправления течи бачков аккумуляторных батарей двигателей «ГАЗ» как катерных, так и автомобильных. А именно: изготавливалась специальная мастика, которой, после предварительной обработки футляра батарей, трещины заливались. Таким способом было отремонтировано большое количество бачков, все они находились длительное время в эксплуатации без дефектов. Такой ремонт бачков давал около 50 руб. экономии на каждой батарее. [25]

Отливка в земляные формы с кристаллизацией сплава под давлением. Практика литейных цехов судоремонтных заводов показала, что одним из весьма действенных средств для получения отливок, на содержащих в себе газовых раковин, рыхлот, усадочной пористости, ликвиции металла, то есть обладающих плотным строением с высокими механическими свойствами, являлись отливки с кристаллизацией сплава под давлением в специальном автоклаве. При этом в сборнике «Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну» описывались: технологический процесс; устройство автоклава; условия для производства работ. [26]

Испытание электродвигателей (Из опыта Судоремонтной мастерской Северного флота). Для выявления дефектов в обмотке машины, предъявленной к ремонту, или для испытания обмотки отремонтированной приходилось полностью собирать машину и испытывать ее на ходу, а при обнаружении неисправности вновь производить разборку и повторный ремонт. При этом непроизводительно затрачивается рабочее время на повторную разборку и сборку.

Для избежания излишних работ при ремонте обмотки электродвигателей было предложено испытания производить без сборки ротора. При отсутствии ротора обмотка статора имеет очень малое омическое сопротивление, почему при включении ее в сеть рабочего напряжения развивались токи большой силы, что могло привести к аварии. Во избежание такого явления, для увеличения сопротивления обмотки за счет сопротивления индукции, пространство между полюсами машины, вместо постановки ротора, заполнялось стержнями из мягкой стали диаметром 25 мм., по длине, немного превышающей длину полюсов.

В этом случае сопротивление статора настолько увеличивалось, что сила тока при испытании превышала нормальную только на 20—40%, что не являлось опасным для изоляции обмотки и позволяло производить испытание статора в условиях, очень близких к эксплуатации.

Таким способом была произведена проверка ряда электродвигателей.

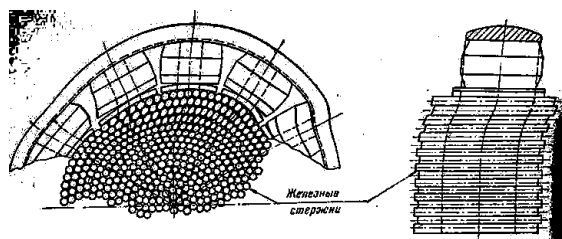


Рис. 8. Расположение железных стержней в статоре

Использование данного предложения давало сокращение рабочей силы слесарей-электромонтажников. [27]

Заключение

Таким образом, в годы Великой Отечественной войны рационализаторская работа на судоремонтных заводах и мастерских НКВМФ была направлена на: улучшение и усовершенствование производства в целом; изыскание дополнительных средств обеспечения производственных процессов; разработку на местах отдельных деталей, производственных технологий, приспособлений и конструкций с привлечением низовых руководителей и рабочей общественности; усовершенствование производственной технологии, конструктивных элементов, инструмента и приспособлений; подбор заменителей дефицитных и недостающих материалов и полуфабрикатов; усовершенствование оборудования, его оснащенность, увеличение диапазона производственных возможностей;

повышение производительности оборудования, износоустойчивости отдельных узлов, конструктивных элементов; борьбу за снижение себестоимости, качество ремонта и продукции; замену остродефицитных материалов, экономию материальных ценностей, топлива, энергии; новые судоремонтные работы; новые технологические процессы; организацию технологических процессов; повышение производительности труда.

Перечисленные примеры рационализаторской работы не являлись исчерпывающими, их главной особенностью стало то, что они были универсальными и могли использоваться на всех судоремонтных предприятиях ВМФ. Но самое главное – рационализаторская работа способствовала развитию массовой творческой инициативе военнослужащих, инженеров, конструкторов, мастеров, рабочих; росту их технического уровня и направлена на достижение победы над немецко-фашистскими захватчиками. [28] При этом, рационализаторская работа носила массовый характер, а изобретения и рационализаторские предложения были новаторскими, прогрессивными, и зачастую, прорывными. Причем скрупулезно теоретически рассчитаны, что свидетельствует не только о широком инженерном и техническом кругозоре, но и солидной базовой теоретической подготовке советских судоремонтников.

Важным элементом являлось стимулирование рационализаторской деятельности инженеров, инженерно-технических работников и рабочих.

Литература

1. Половинкин В.Н., Федулов С.В., Барбанель Б.А. Рационализаторская работа на судоремонтных предприятиях в годы Великой Отечественной войны. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. С. 4.
2. Половинкин В.Н., Федулов С.В., Барбанель Б.А. Рационализаторская работа на судоремонтных предприятиях в годы Великой Отечественной войны. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. С. 23.
3. Половинкин В.Н., Федулов С.В., Барбанель Б.А., Соловьев Д.Н. Изобретательская работа на флоте в годы Великой Отечественной войны. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. – С. 15.
4. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 3
5. Филиал ЦА МО РФ (архив ВМФ, г. Гатчина). Ф. 3681. Оп. 35715. Д. 23. Л. 14.
6. Филиал ЦА МО РФ (архив ВМФ, г. Гатчина). Ф. 3681. Оп. 35715. Д. 23. Л. 15.
7. Филиал ЦА МО РФ (архив ВМФ, г. Гатчина). Ф. 4534. Оп. 31039. Д. 1. Л. 125-128.
8. Филиал ЦА МО РФ (архив ВМФ, г. Гатчина). Ф. 4534. Оп. 31039. Д. 1. Л. 126.
9. Филиал ЦА МО РФ (архив ВМФ, г. Гатчина). Ф. 4534. Оп. 31039. Д. 1. Л. 129-129 об.
10. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 34–43.
11. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 43–45.
12. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 45–51.
13. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 51–53.
14. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 53–57.
15. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 57–59.
16. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 59–64.
17. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 64–65.
18. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 64–65.
19. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 69–70.

20. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 24–25.
21. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 25–26.
22. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 26.
23. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 26–28.
24. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 28–31.
25. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 31.
26. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 31–33.
27. Опыт судоремонта и освоение новых видов производства на судоремонтных предприятиях ВМФ в Отечественную войну. М.-Л.: Военмориздат НКВМФ, 1944. – С. 33–34.
28. Половинкин В.Н., Федулов С.В., Барбанель Б.А. Рационализаторская работа на судоремонтных предприятиях в годы Великой Отечественной войны. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. – С. 128-129.

References

1. Polovinkin V.N., Fedulov S.V., Barbanel' B.A. *Racionalizatorskaya rabota na sudoremontnyh predpriyatiyah v gody Velikoj Otechestvennoj vojny* [Rationalization work at shipyards during the Great Patriotic War]. SPb.: Publishing house of ETU "LETI". 2020. P. 4.
2. Polovinkin V.N., Fedulov S.V., Barbanel' B.A. *Racionalizatorskaya rabota na sudoremontnyh predpriyatiyah v gody Velikoj Otechestvennoj vojny* [Rationalization work at shipyards during the Great Patriotic War]. SPb.: Publishing house of ETU "LETI". 2020. P. 23.
3. Polovinkin V.N., Fedulov S.V., Barbanel' B.A., Solov'ev D.N. *Izobretatel'skaya rabota na flote v gody Velikoj Otechestvennoj vojny*. [Inventive work in the Navy during the Great Patriotic War] SPb.: Publishing house of ETU "LETI". 2020. Pp. 15.
4. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 3
5. Filial CA MO RF (arhiv VMF, g. Gatchina). [Branch of the Central Archive of the Ministry of Defense of the Russian Federation (archive of the Navy, Gatchina)] F. 3681. Op. 35715. D. 23. L. 14.
6. Filial CA MO RF (arhiv VMF, g. Gatchina). [Branch of the Central Archive of the Ministry of Defense of the Russian Federation (archive of the Navy, Gatchina)] F. 3681. Op. 35715. D. 23. L. 15.
7. Filial CA MO RF (arhiv VMF, g. Gatchina). [Branch of the Central Archive of the Ministry of Defense of the Russian Federation (archive of the Navy, Gatchina)] F. 4534. Op. 31039. D. 1. L. 125-128.
8. Filial CA MO RF (arhiv VMF, g. Gatchina). [Branch of the Central Archive of the Ministry of Defense of the Russian Federation (archive of the Navy, Gatchina)] F. 4534. Op. 31039. D. 1. L. 126.
9. Filial CA MO RF (arhiv VMF, g. Gatchina). [Branch of the Central Archive of the Ministry of Defense of the Russian Federation (archive of the Navy, Gatchina)] F. 4534. Op. 31039. D. 1. L. 129-129 ob.
10. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 34–43.
11. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 43–45.
12. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 45–51.
13. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 51–53.
14. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 53–57.
15. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 57–59.
16. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 59–64.
17. *Opyt sudoremonta i osvoenie novyh vidov proizvodstva na sudoremontnyh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu*. [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp. 64–65.

18. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.64–65.
19. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.69–70.
20. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.24–25.
21. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.25–26.
22. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.26.
23. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.26–28.
24. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.28–31.
25. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. P.31.
26. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.31–33.
27. *Opyt sudoremonta i osvoenie novykh vidov proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyah VMF v Otechestvennuyu vojnu.* [Experience in ship repair and the development of new types of production at the ship repair enterprises of the Navy in the Patriotic War] M.-L.: Voenmorizdat NKVMF Publ., 1944. Pp.33–34.
28. Polovinkin V.N., Fedulov S.V., Barbanel' B.A. *Racionalizatorskaya rabota na sudoremontnykh predpriyatiyah v gody Velikoy Otechestvennoy vojny* [Rationalization work at shipyards during the Great Patriotic War]. SPb.: Publishing house of ETU "LETI". 2020. Pp. 128–129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Николаевич Половинкин, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44; e-mail: vnpolo@yandex.ru

Valerij N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng), Professor, Scientific director Krylov State Research Centre, Russian Federation, 196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44, e-mail: vnpolo@yandex.ru

Сергей Валентинович Федулов, доктор исторических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономических дисциплин Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13; e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

Sergey V. Fedulov, Dr. Sci. (Historical), Assistant professor of the Department of Socio-Economic Disciplines Mozhaisky Military Space Academy, Russian Federation, 197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya street, 13, e-mail: serg.val.fed.661000@yandex.ru

Дмитрий Николаевич Соловьев, доктор исторических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономических и гуманитарных дисциплин Михайловская военная артиллерийская академия, 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 22; e-mail: botanik-s@yandex.ru

Dmitry N. Soloviev, Dr. Sci. (Historical), Assistant professor of the Department of Socio-Economic and Humanities Disciplines Mikhailovskaya Military Artillery Academy, Russian Federation, 195009, St. Petersburg, Komsomol street, 22, e-mail: botanik-s@yandex.ru

Наталья Николаевна Мизиркина, преподаватель кафедры социально-экономических дисциплин Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13; e-mail: nmizirkina@mail.ru.

Nataliya N. Mizirkina, educationist of the Department of Socio-Economic Disciplines Mozhaisky Military Space Academy, Russian Federation, 197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya street, 13, e-mail: nmizirkina@mail.ru

Поступила в редакцию: 12.04.2021

Принята к публикации: 15.05.2021

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 532.526.2.624.124

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.003>

Зависимость напряженно-деформированного состояния ледяного покрова от его физико-механических свойств в условиях изгибно-гравитационного резонанса

В.М. Козин¹ e-mail: kozinvictor@rambler.ru¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация. Рассмотрено влияние физико – механических характеристик льда на напряженно-деформированное состояние (НДС) ледяного покрова при его деформировании изгибно – гравитационными волнами (ИГВ), возбуждаемыми движущейся по льду нагрузкой с резонансной скоростью, т.е. в условиях изгибно-гравитационного резонанса (ИГР). Исследования проведены с целью дальнейшего изучения возможностей резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ), осуществляемого судами на воздушной подушке (СВП). Отмечено, что в определенных ледовых условиях РМРЛ может оказаться эффективнее существующих традиционных технологий разрушения ледяного покрова. Перечислены основные физико-механические свойства льда, влияющие на НДС ледяного покрова в условиях ИГР. Приведены наиболее вероятные диапазоны их изменения. Задача о деформировании ледяного покрова перемещающейся по нему распределенной нагрузкой рассматривается в линейной постановке. Лёд моделируется изотропной пластиной бесконечной протяжённости, поведение которой описывается реологической вязко – упругой моделью Кельвина – Фойгта. Работоспособность полученных зависимостей проверена путем сопоставления результатов численных расчётов прогибов льда с данными натурных экспериментов. Приведены результаты теоретических исследований влияния на НДС ледяного покрова изменения параметров основных физико-механических характеристик льда в пределах их наиболее вероятного диапазона изменения при резонансной скорости движения нагрузки. Сделан вывод, что при расчетах НДС ледяного покрова в условиях ИГР, т.е. при определении толщины ледяного покрова, разрушаемого СВП резонансным методом, следует уточнять только значение модуля Юнга для конкретных ледовых условий. Остальные характеристики льда можно выбирать в соответствии с их средненными значениями.

Ключевые слова: ледяной покров, изгибно–гравитационные волны, напряженно-деформированное состояние, свойства льда, резонанс.

Dependence of the stress-strain state of the ice cover on its physical and mechanical properties under conditions of bending-gravitational resonance

Viktor M. Kozin¹ e-mail: kozinvictor@rambler.ru¹Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The influence of the physical and mechanical characteristics of ice on the stress – strain state (SSS) of the ice cover when it is deformed by bending-gravitational waves (IGW) caused by a load moving along the ice at a resonant speed, i.e. under conditions of bending – gravitational resonance (IGR), is considered. The research was conducted in order to further study the possibilities of the resonant method of ice cover destruction (RMRL), carried out by hovercraft (SVP). It is noted that in certain ice conditions, RMRL can be more effective than existing traditional technologies of ice cover destruction. The main physical and mechanical properties of ice that affect the VAT of the ice cover in the conditions of GAMES are listed. The most probable ranges of their changes are given. The problem of ice cover deformation by a distributed load moving along it is considered in a linear formulation. Ice is modeled by an isotropic plate of infinite extent, the behavior of which is described by the rheological viscoelastic Kelvin-Voigt model. The efficiency of the obtained dependences was verified by comparing the results of numerical calculations of ice deflections with the data of field experiments. The results of theoretical studies of the influence of changes in the values of the main physical and mechanical characteristics of ice within their most probable range of changes at the resonant speed of the load movement on the ice cover VAT are presented. It is concluded that when calculating the VAT of ice cover in the conditions of GAMES, i.e. when determining the thickness of the ice cover destroyed by the SVP resonance method, it is necessary to specify only the value of the Young's modulus for specific ice conditions. Other ice characteristics can be selected according to their averaged data.

Key words: ice cover, flexural–gravity waves, the stress-strain state of the properties of ice, resonance.

Введение

Прочностные свойства льда не только влияют на его сопротивление разрушению, но и определяют грузоподъемность ледяного покрова.

Эти свойства льда используются при решении многих важных народнохозяйственных задач ледотехники, например, таких, как продление навигации на замерзающих водных путях, предотвращение ледовых осложнений в виде

заторов и зажоров путем их разрушения, использование ледяного покрова в качестве несущих платформ, автозимников, ледяных переправ, взлетно – посадочных полос и пр. Их изучением занимались и продолжают заниматься такие, ранее известные организации, как: Арктический и антарктический научно – исследовательский институт; Всесоюзный научно – исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева; Московский государственный университет им. М.В.

Ломоносова; Ленинградский государственный университет; Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева и др. Выполненные ими исследования, несмотря на значительный разброс в полученных численных величинах измеренных параметров физико-механических характеристик льда, позволили И.Г. Петрову обобщить, систематизировать и определить их наиболее вероятные значения [3].

Поскольку состояние льда в составе ледяного покрова не стабильно во времени и изменяется в зависимости от времени года, атмосферных условий, истории ледостава, солёности льда и пр. возникает необходимость исследовать, какие из физико-механических свойств льда оказывают значительное влияние на напряженно – деформированное состояние (НДС) ледяного покрова в пределах изменения их наиболее вероятных значений при воздействии на него движущихся нагрузок.

В данной работе рассмотрено влияние физико – механических характеристик льда на НДС ледяного покрова при его деформировании изгибно – гравитационными волнами ИГВ, возбуждаемыми движущейся по льду нагрузкой с резонансной скоростью [4], т.е. в условиях ИГР. Исследования проведены с целью дальнейшего изучения возможностей РМРЛ, осуществляемого судами на воздушной подушке (СВП), сущность которого изложена в работе [7]. Их целесообразность объясняется тем, что, как показали выполненные эксперименты [4], в определенных ледовых условиях РМРЛ может оказаться эффективнее существующих традиционных технологий разрушения ледяного покрова.

1. Теоретические зависимости деформирования ледяного покрова движущейся нагрузкой

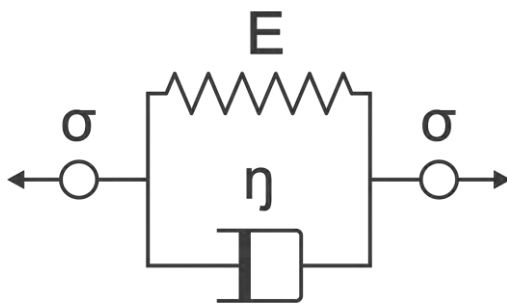


Рис. 1. Модель вязко - упругой среды Кельвина – Фойгта

Деформирование ледяного покрова перемещающейся по нему распределенной нагрузкой рассматривается в линейной постановке. Лёд моделируется изотропной пластиной бесконечной протяжённости, поведение которой описывается реологической вязко – упругой моделью Кельвина – Фойгта [5], механическая модель которой приведена на рис. 1.

В этом случае дифференциальное уравнение динамического изгиба вязко-упругой ледяной пластины при установившемся движении сосредоточенной силы P с постоянной скоростью v может быть записано в виде [5]:

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_b g w + \rho_a h \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \rho_b \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = P \delta(x - vt, y - 0), \tag{1}$$

где: $G=E/2(1+\mu)$ - модуль сдвига; E - модуль упругости льда; μ - коэффициент Пуассона; τ_ϕ - время релаксации деформаций (время запаздывания); ρ_b, ρ_l - плотность воды и льда; g - ускорение силы тяжести; w - прогиб льда; h - толщина ледяного покрова; Φ - потенциал движения жидкости, удовлетворяющий уравнению Лапласа во всем объеме воды и условиям непроницаемости на дне бассейна; δ - дельта-функция Дирака.

Для бесконечной области дельта – функции Дирака в этом случае может быть представлена двойным интегралом Фурье:

$$\delta(x - vt, y - 0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-i[\lambda(x - vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta \tag{2}$$

Тогда прогиб льда w и потенциал движения жидкости Φ будем искать в виде:

$$w(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-i[\lambda(x - vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta, \tag{3}$$

$$\Phi(x, y, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\lambda\eta} ch[(H+x)\sqrt{\lambda^2 + \eta^2}] \exp\{-i[\lambda(x - vt) + \eta y]\} d\lambda d\eta \tag{4}$$

Подставляя выражения (2), (3) в (1) и учитывая линейризованное кинематическое условие, выражающее равенство нормальной компоненты скорости жидкости на ее поверхности скорости нормального перемещения льда

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0,$$

получим окончательное выражение для w :

$$w = \frac{p}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{-i[\lambda(x - vt) + \eta y]\}}{\frac{Gh^3}{3} (\lambda^2 + \eta^2)^2 - \lambda^2 v^2 \rho_a h + \rho_b g - \frac{\rho_b \lambda^2 v^2}{th(H\sqrt{\lambda^2 + \eta^2})\sqrt{\lambda^2 + \eta^2}} + i \frac{Gh^3}{3} \tau_\phi \lambda v (\lambda^2 + \eta^2)} d\lambda d\eta \tag{5}$$

Линейная постановка задачи позволяет с помощью принципа суперпозиций легко перейти от полученного решения для сосредоточенной силы к случаю движения по льду ограниченной в плане нагрузки. Перейдем от выражения (5) к нагрузке, распределенной по площади прямоугольника со сторонами $2a$ и $2b$. В общем случае прогиб ледяного покрова определится после интегрирования по переменным ξ, ζ

$$w = \frac{1}{(2\pi)^2} w = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q(\xi, \zeta)}{F(\lambda, \eta)} \exp\{-i[\lambda(x - \xi - vt) + \eta(y - \zeta)]\} d\lambda d\eta d\xi d\zeta, \quad (6)$$

где:

$$F(\lambda, \eta) = \frac{Gh^3}{3} (\lambda^2 + \eta^2)^2 - \lambda^2 v^2 \rho_a h + \rho_b g - \frac{\rho_b \lambda^2 v^2}{th(H\sqrt{\lambda^2 + \eta^2})\sqrt{\lambda^2 + \eta^2}} + i \frac{Gh^3}{3} \tau_\varphi \lambda v (\lambda^2 + \eta^2)^2.$$

Будем рассматривать нагрузку, равномерно распределенную по площади прямоугольника. Тогда в результате интегрирования получим:

$$w = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \lambda a \sin \eta b \exp\{-i[\lambda(x - vt) + \eta y]\}}{\lambda \eta F(\lambda, \eta)} d\lambda d\eta \quad (7)$$

где $q = P/4ab$.

Введем обозначения:

$$A = \lambda \eta \left[\frac{Gh^3}{3} (\lambda^2 + \eta^2)^2 - \lambda^2 v^2 \rho_a h + \rho_b g - \frac{\rho_b \lambda^2 v^2}{th(H\sqrt{\lambda^2 + \eta^2})\sqrt{\lambda^2 + \eta^2}} \right];$$

$$B = \lambda^2 \eta \frac{Gh^3}{3} \tau_\varphi v (\lambda^2 + \eta^2)^2;$$

$$C = \sin \lambda a \sin \eta b;$$

$$\varphi = \lambda(x - vt) + \eta y.$$

Выделяя его действительную часть, запишем:

$$w = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C[A \cos \varphi - B \sin \varphi] d\lambda d\eta}{A^2 + B^2}. \quad (8)$$

Выражения изгибающих моментов запишутся так:

$$\begin{cases} M_x = -\frac{Gh^3}{3} \left(1 - \tau_\varphi \frac{\partial}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right); \\ M_y = -\frac{Gh^3}{3} \left(1 - \tau_\varphi \frac{\partial}{\partial t}\right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right); \\ M_{xy} = -\frac{Gh^3(1 - \mu)}{3} \left(1 + \tau_\varphi \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{cases} \quad (9)$$

Возьмем частные производные и введем обозначения:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda^2 C(-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_1;$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta^2 C(-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_2;$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda \eta C(-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_3;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda^3 v C(-A \sin \varphi - B \cos \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_4;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda \eta^2 v C(-A \sin \varphi - B \cos \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_5;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right) = \frac{q}{\pi^2} * \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda \eta^2 v C(-A \sin \varphi - B \cos \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2} = D_6;$$

Тогда выражения для изгибающих моментов окончательно переписутся в виде:

$$\begin{cases} M_x = -\frac{Gh^3}{3} [D_1 + \mu D_2 + \tau_\varphi (D_4 + \mu D_5)] \\ M_y = -\frac{Gh^3}{3} [D_2 + \mu D_1 + \tau_\varphi (D_4 + \mu D_5)] \\ M_{xy} = -\frac{Gh^3(1 - \mu)}{3} (D_3 + \tau_\varphi D_6) \end{cases}$$

Максимальные погонные напряжения определяются из зависимостей:

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h^2}; \quad \tau_{xy} = \frac{6M_{xy}}{h^2}.$$

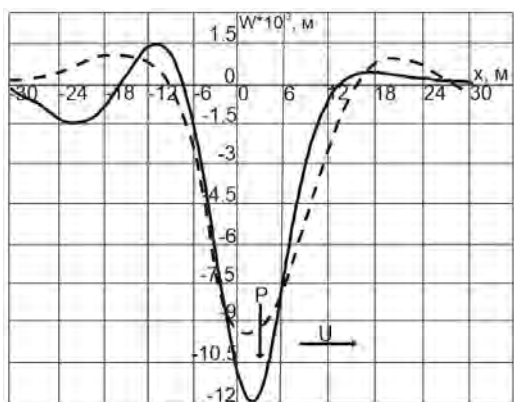
Подинтегральные выражения для интересующих нас скоростей нагрузки не имеют особенностей на действительной оси и убывают при $\lambda, \eta \rightarrow \infty$, т.е. интегралы являются сходящимися. В силу этого к ним можно применить формулы численного интегрирования и рассчитать НДС ледяного покрова в условиях ИГР.

Для проверки работоспособности приведенных выше зависимостей было проведено сопоставление результатов численных расчётов прогибов льда с данными натурных экспериментов [6] при принятых физико-механических параметрах льда, соответствующих ледовым условиям и характеристикам использовавшейся в эксперименте движущейся нагрузки (аэросаней), а

именно: $\rho_b = 900 \text{ кг/м}^3$; $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\tau_\varphi = 10 \text{ с}$; $\mu = 1/3$; $E = 0,5 \text{ ГПа}$; $h = 0,075 \text{ м}$; $H = 6,8 \text{ м}$; $2a = 1,23 \text{ м}$; $2b = 0,48 \text{ м}$; $q = 406,5 \text{ Па}$.

Их результаты представлены на рис. 2. (направление движения нагрузки указано горизонтальной стрелкой, ось приложения нагрузки - вертикальной стрелкой).

а)



б)

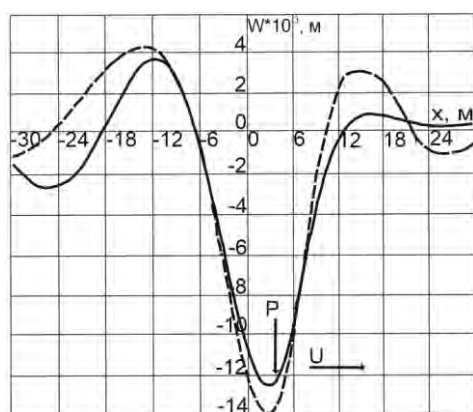


Рис. 2. Сопоставление численных расчётов с данными натурных экспериментов: а) $U = 4.2$ м/с; б) $U = 4.2$ м/с; (—) – численный результат; (---) – натурный эксперимент

Как видно, в области больших прогибов, то есть при ИГР (возникновении наибольших деформаций), результаты численных расчётов удовлетворительно совпадают с данными натурных экспериментов.

2. Влияние физико-механических свойств льда на параметры резонансных изгибно-гравитационных волн

В условиях изгибно-гравитационного резонанса на НДС ледяного покрова в основном влияют следующие физико-механические свойства льда: модуль Юнга; коэффициент Пуассона и его плотность [5]. В зависимости от времени года, атмосферных условий, солёности, заснеженности, истории ледостава и пр. эти свойства изменяются в довольно широких пределах. Наиболее вероятные диапазоны их изменения представлены в табл. 1, 2 [3].

Как показали выполненные эксперименты [7], процесс разрушения ледяного покрова резонансными ИГВ начинался с образования во льду длинных поперечных по отношению к направлению движения СВП трещин (рис. 3, 4 автора), т.е. при достижении изгибными напряжениями σ_x предел прочности льда. Поэтому, результаты влияния физико-механических характеристик на НДС ледяного покрова приведено только для прогибов льда w и σ_x (рис. 5 - 7).

Таблица 1

Экстремальные и наиболее вероятные значения модуля Юнга

Метод измерения	Температура льда, °C	Модуль Юнга, МПа
Статический	[-3;-8]	2900 – 4310
Резонансный	[0;-10]	8630 – 9950
Сейсмический	[-5;-10]	6860 – 12300
Наиболее вероятные значения:		3920 – 8620

Таблица 2

Наиболее вероятные значения плотности льда и коэффициента Пуассона

Лёд	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Пресноводный	870 – 917	0,42 – 0,34
Морской	900 – 910	0,40 – 0,30



Рис. 3. Возникновение во льду длинных поперечных трещин от ИГВ, возбуждаемых СВП "Скат"

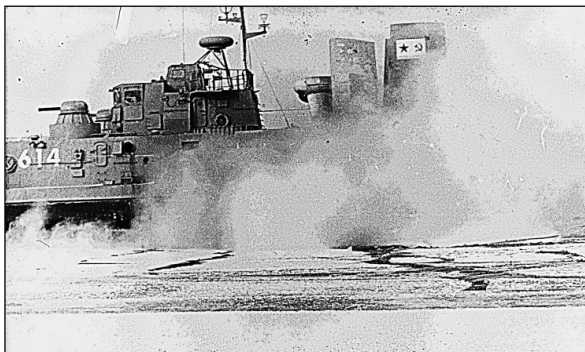


Рис. 4. Возникновение во льду длинных поперечных трещин от ИГВ, возбуждаемых СВП "Мурена"

Влияние изменения указанных свойств на параметры НДС ледяного покрова рассмотрено в пределах их наиболее вероятных значений. Расчеты выполнены на примере СВП "Мурена" в реальных при проведении экспериментов (рис. 4) ледовых условиях: $2a = 30$ м; $2b = 13$ м; $q = 3330$ Па; $u = 7$ м/с; $\rho_s = 900$ кг/м³; $\rho_n = 1000$ кг/м³; $\tau_\phi = 10$ с; $\mu = 1/3$; $E = 5$ ГПа; $h = 0,5$ м; $H = 5$ м. Результаты расчетов при резонансной скорости движения нагрузки (в указанных ледовых условиях она равнялась $u = 7$ м/с [5]) приведены на рис. 5 - 7. Сопоставление полученных эпюр напряжений и прогибов показывает, что вне области приложения нагрузки максимальные напряжения возникают не в точке наибольшей кривизны (как для абсолютно упругой пластины), а ближе к точке перегиба кривой прогибов, что объясняется вязко - упругими свойствами выбранной в расчетах реологической модели. Аналогичный результат был получен С.С. Голушкевичем для плоской задачи [8], что также следует из общности механизма деформирования указанной среды: в таких условиях ледяной покров рассматривается как вязко-упругая пластина, напряжения в которой определяются не только кривизной, но и скоростью изменения деформационной пластины, т.е. определяются как алгебраическая сумма напряжений, возникающих при изгибе и сдвиге. Из рис. 5 - 7 следует, что из рассмотренных свойств льда на параметры ИГВ, а, значит и НДС ледяного покрова, существенное влияние оказывает только изменение упругих свойств льда, т.е. модуль Юнга (см. рис. 5 - 6). Так, при изменении его значения в указанных пределах величины прогибов и изгибных напряжений менялись примерно на 25 -30%. При

этом оказалось, что влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры ИГВ, как видно из рис. 7, - незначительно, а влиянием изменения плотности льда в наиболее вероятных диапазонах ее изменения вообще можно пренебречь (по этой причине эти зависимости не приведены).

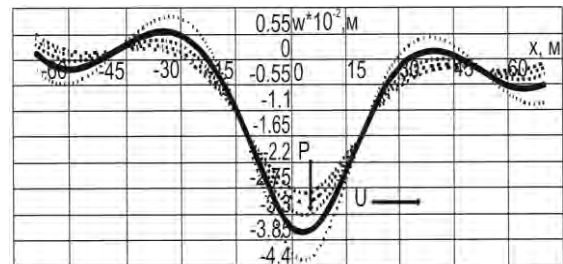


Рис. 5. Влияние изменения модуля Юнга на параметры ИГВ: (.....) - $E = 4000$ МПа; (—) - $E = 5000$ МПа; (- - -) - $E = 6000$ МПа; (- · - ·) - $E = 7500$ МПа; (- · · -) - $E = 8500$ МПа

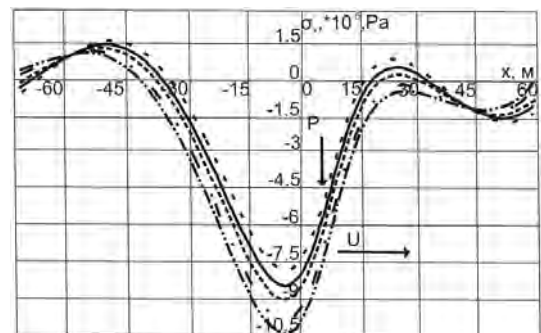


Рис. 6. Влияние изменения модуля Юнга на напряжения σ_x : (- · · -) - $E = 4000$ МПа; (- · - ·) - $E = 5000$ МПа; (- - -) - $E = 6000$ МПа; (—) - $E = 7500$ МПа; (.....) - $E = 8500$ МПа

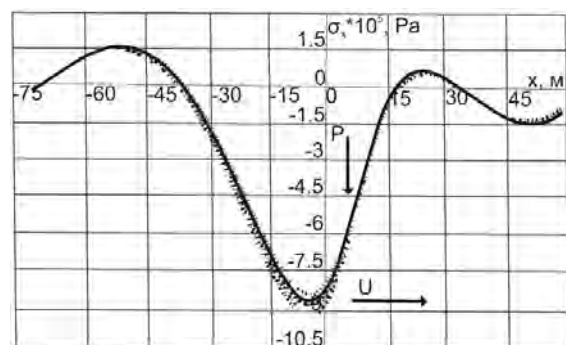


Рис. 7. Влияние изменения коэффициента Пуассона на напряжения σ_x : (.....) - $\mu = 0,3$; (—) - $\mu = 0,33$; (- - -) - $\mu = 0,36$; (- · - ·) - $\mu = 0,39$; (- · · -) - $\mu = 0,42$

Закключение

При расчетах НДС ледяного покрова в условиях изгибно-гравитационного резонанса, т.е. при исследованиях несущей способности ледяного покрова при распространении в нем изгибно - гравитационных волн с резонансными скоростями

или исследовании возможностей резонансного метода разрушения ледяного покрова, реализуемого, например СВП, в теоретических расчетах следует уточнять только значение модуля Юнга с учетом конкретных ледовых условий.

Остальные характеристики льда можно выбирать в соответствии с их осредненными значениями.]

Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Литература

1. Козин В. М., Погорелова А.В. Волновое сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке при движении по ледяному покрову. Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44. – № 2. – С. 49-55.
2. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 191 с. ISBN 5-8044-0508-X
3. Петров, И. Г. Выбор наиболее вероятных значений физико-механических свойств льда. Труды ААНИИ. 1976. Т. 331, с. 4-41.
4. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия Естествознания, 2008. – 329 с. ISBN 978-5-91327-019-1
5. Хейсин, Д. Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 215 с.
6. Takizawa, T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load / T. Takizawa // Cold Regions Science and Technology. 1985. Vol. 11, P. 123-139.
7. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М.: Изд-во «Академия Естествознания». 2007. – 355 с. ISBN 978-5-91327-017-7
8. Голушкевич С.С. О некоторых задачах теории изгиба ледяного покрова. Л.: Воениздат, 1947. - 231 с.

References

1. Kozin V. M., Pogorelova A.V. Volnovoye soprotivleniye amfibiynykh sudov na vozdushnoy podushke pri dvizhenii po ledyanomu pokrovu. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. – 2003. – Т. 44. – № 2. – p. 49-55.
2. Ledorazrushayushchaya sposobnost izgibno-gravitatsionnykh voln ot dvizheniya obyektov / V. M. Kozin, A. V. Onishchuk, B. N. Marin [i dr.]. – Vladivostok: Dalnauka. 2005. – 191 p. ISBN 5-8044-0508-X
3. Petrov. I. G. Vybora naiboleye veroyatnykh znacheniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv lida. Trudy AANII. 1976. T. 331. p. 4-41.
4. Prikladnyye zadachi dinamiki ledyanogo pokrova / V. M. Kozin. V. D. Zhestkaya. A. V. Pogorelova [i dr.]. – M.: Akademiya Estestvoznaniya. 2008. – 329 p. ISBN 978-5-91327-019-1
5. Kheysin. D. E. Dinamika ledyanogo pokrova. L.: Gidrometeoizdat. 1967. – 215 p.
6. Takizawa. T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load / T. Takizawa // Cold Regions Science and Technology. 1985. Vol. 11. p. 123-139.
7. Kozin V.M. Rezonansnyy metod razrusheniya ledyanogo pokrova. Izobreteniya i eksperimenty. M.: Izd-vo «Akademiya Estestvoznaniya». 2007. – 355 p. ISBN 978-5-91327-017-7
8. Golushkevich S.S. O nekotorykh zadachakh teorii izgiba ledyanogo pokrova. L.: Voenizdat. 1947. - 231 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Михайлович Козин, доктор технических наук, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Viktor M. Kozin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Shipbuilding Department, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgov st., e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Поступила в редакцию: 15.03.2021

Принята к публикации: 12.05.2021

УДК 629.5:539.433

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.004>

Влияние вибрационных нагрузок на прочность листовых композитных элементов судовых конструкций

С.И. Корягин¹ e-mail: skoryagin@kantiana.ru, Н.Л. Великанов¹ e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
О.В. Шарков¹ e-mail: osharkov@kantiana.ru

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. Использование листовых композитных элементов при ремонте судовых корпусных конструкций выдвигает как актуальную задачу определения влияния вибрационных нагрузок на прочностные характеристики конструкций с композитными элементами. Имеющиеся методики расчета металлических пластин под действием вибрационных нагрузок не могут быть применены для композитных элементов без дополнительных исследований. Разработаны установка и методика проведения экспериментальных исследований. Нагрузки проводились циклами различной продолжительности. Представлены полученные зависимости предела прочности материала от числа циклов нагружения, При этом учитывалась ориентация исследуемых слоев относительно приложенной нагрузки. В процессе исследований установлено, что полимерные покрытия способны поглощать часть вибрационной нагрузки и изменять частоты собственных колебаний конструкции. Разработанная экспериментальная установка и методика испытаний позволяют опытным путем определить напряженно-деформированное состояние конструкции с композитными элементами.

Ключевые слова: вибрационная нагрузка, листовые композитные элементы, судовые конструкции, предел прочности.

Influence of vibration loads on the strength of sheet composite elements of ship structures

Sergey I. Koryagin¹ e-mail: skoryagin@kantiana.ru, Nikolay L. Velikanov¹ e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,
Oleg V. Sharkov¹ e-mail: osharkov@kantiana.ru

¹Immanuel Kant Baltic Federal University

Abstract. The use of sheet composite elements in the repair of ship hull structures puts forward as an urgent task to determine the influence of vibration loads on the strength characteristics of structures with composite elements. The available methods for calculating metal plates under the influence of vibration loads cannot be applied to composite elements without additional research. The setup and methodology for conducting experimental studies have been developed. The loads were carried out in cycles of different duration. The obtained dependences of the ultimate strength of the material on the number of loading cycles are presented, taking into account the orientation of the studied layers relative to the applied load. In the course of research, it was found that polymer coatings are able to absorb part of the vibration load and change the natural vibration frequencies of the structure. The developed experimental setup and test procedure allow us to determine the stress-strain state of the structure with composite elements by experimental means.

Key words: vibration load, sheet composite elements, ship structures, ultimate strength.

Введение

В процессе эксплуатации судов их конструктивные элементы находятся под воздействием вибрационных нагрузок с различными амплитудно-частотными характеристиками [1–5].

Вибрационные нагрузки возникают под воздействием как внешних, так и внутренних факторов.

Например, для корпуса судна внешним фактором является силовое воздействие со стороны волн. Внутренними факторами являются работа судовых силовых установок, вспомогательных машины и механизмы. Значительное вибрационное воздействие на корпус судна оказывают гребные винты и валопроводы.

В современном судостроении находят широкое применение конструкции из композитных материалов [6–11], которые при малом удельном весе обладают большой прочностью, достаточной жесткостью, хорошей коррозионной стойкостью и демпфирующей способностью и другими важными преимуществами.

Под воздействием вибрационных нагрузок механические характеристики композитных

элементов могут ухудшаться, изменить изначально заложенные параметры, а в отдельных случаях преждевременно потерять свою работоспособность.

Особенно важно учитывать стабильность эксплуатационных свойств у листовых композитных элементов, так как устойчивость к вибрационным нагрузкам снижается при уменьшении толщины композита.

При этом результаты, полученные для листовых металлических элементов, не могут быть непосредственно применены для композитных материалов в следствии различия их структуры.

Несмотря на многочисленные исследования изменения свойств композитных материалов под воздействием ударных и вибрационных нагрузок [11–16], это вопрос изучен еще не достаточно, особенно для судовых конструктивных элементов.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследования изменения прочности судовых листовых композитных элементов, подверженных вибрационному нагружению в процессе эксплуатации.

1. Исследование влияния вибрации на прочность листовых композитных элементов

1.1. Теоретические предпосылки

Экспериментальная оценка несущей способности инженерной конструкции, работающей под воздействием вибрации, начинается с определения её собственной частоты колебаний, так как испытания должны проводиться при вибрационной нагрузке, действующей с частотой близкой к резонансной.

Для обеспечения получения максимального значения амплитуды колебаний листовых элементов при существующей схеме установки и мощности вибростенда необходимо, чтобы задаваемая источником колебаний частота совпадала с низшей частотой свободных колебаний элемента.

Приближенное определение частот свободных колебаний листовых элементов, жестко заделанных по всему контуру, проводили по известным зависимостям.

В первом случае частота свободных колебаний первого тона определяется выражением [17]:

$$N_{e1} = 214 \gamma^{-2} \sqrt{\frac{gKD_2}{\gamma h} \left[\frac{D_1 \gamma^4}{D_2 x^4} + \frac{0,608 D_3 \gamma^2}{D_2 x^2} + 1 \right]}, \quad (1)$$

где D_1 , D_2 – цилиндрические жесткости в направлении по утку и основе соответственно; $D_3 = D_1 \nu + D_4$; D_4 – жесткость кручения; ν – коэффициент Пуассона в направлении по основе; $x = y$ – рабочие размеры листового элемента по утку и основе соответственно; K – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение свойств армированного полимерного покрытия; h – толщина элемента; γ – удельный вес материала; g – ускорение силы тяжести.

Во втором случае частоту определяли из выражения [18]:

$$N_{e2} = 633 \delta^{-2} \sqrt{\frac{q(D_1 + 0,667 D_3 + D_2)}{\gamma \delta}}. \quad (2)$$

В качестве исходных данных приняты: размеры листового элемента $x = y = 750$ мм; коэффициент $K = 0,58$; удельный вес $\gamma = 1700$ кг/м³; толщина $h = 4$ мм; ускорение силы тяжести $g = 9,81$ м/с².

В результате расчетов по формулам (1) и (2) получили $N_{e1} = 1,93 \cdot 10^3$ кол/мин ≈ 32 Гц и $N_{e2} = 2,15 \cdot 10^3$ кол/мин ≈ 36 Гц.

Полученные расчетные значения диапазона изменения частоты собственных колебаний листового композиционного элемента (32...34 Гц) являются основанием для выбора типа и параметров испытательной установки.

При сравнительном анализе прочности судовых листовых композитных элементов будем использовать механический подход, а в качестве критерия сравнения примем величину предела прочности σ_b , которая широко используется при исследовании композитов.

1.2. Испытательная установка

Для исследования влияния вибрационных нагрузок на несущую способность судовых листовых элементов, выполненных из армированного полимерного материала на базе вибрационного стенда ВЭДС-200А была изготовлена испытательная установка (рис. 1) и разработана методика проведения экспериментальных исследований.

Установка состояла из верхней 1 и нижней 2 опорной рамы, которые одновременно устанавливались непосредственно на подвижный стол 3 электродинамического вибратора 4 и подвешивались на упругих подвесках 5 (резиновых жгутах) к внешнему каркасу.

Упругие подвески 5 крепились на стойках 6, соединенных с вибропоглощающим фундаментом 7. В этом случае максимальная статическая нагрузка на стол составляла 450 Н.

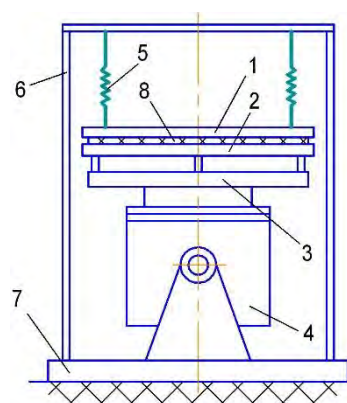


Рис. 1. Схема установки для испытания судовых листовых элементов на вибрационную нагрузку

Листовой элемент 8, помещали между верхней 1 и нижней 2 опорными рамами, стянутыми по контуру болтами, что соответствовало случаю жесткой заделки всех четырех его кромок.

Размеры упругих подвесок 5 выбирали из двух основных условий:

1. резиновые жгуты должны работать в линейной области;
2. частота колебаний системы резиновые жгуты-рама должна быть существенно ниже собственной частоты свободных колебаний листового элемента.

Длина резиновых жгутов составляла 170 мм, число резиновых волокон в каждом жгуте равнялось 230 штук при диаметре волокна 1 мм.

В этих условиях коэффициент динамичности для системы резиновые жгуты-рама (по отношению к заданному вибрационному воздействию) оказался ничтожно малым ($\approx 0,003$), то есть практически вся энергия расходовалась в прямых целях.

Для контроля уровня деформаций листового элемента был использован комплекс измерительной аппаратуры, состоящий из усилителя и электронно-лучевого осциллографа.

В качестве первичного прибора применены тензодатчики сопротивления типа, наклеенные с обеих сторон по 12 штук на каждый элемент [18]. Тензодатчики присоединялись к входным устройствам усилителя, выходной сигнал которого подавался на вход осциллографа.

На первом подготовительном этапе испытаний проведена тарировка испытательной установки.

1.3. Экспериментальные образцы и методика проведения испытаний

Для проведения испытаний было изготовлено девять листовых элементов из армированного полимерного материала, имеющий размер рабочей части 4x750x750 мм (рис. 2).

Листовой элемент формировался на основе стеклоткани марки Т-11-ГВС-9, пропитанной клеевой композицией типа «ВАК-А».

Испытания проводили для трех серий экспериментальных образцов по три листовых элемента в каждой. Первая серия была подвергнута $N=7 \cdot 10^6$ циклам вибрационных нагружений, вторая – $N=10 \cdot 10^6$ циклам, третья – $N=11 \cdot 10^6$ циклам.

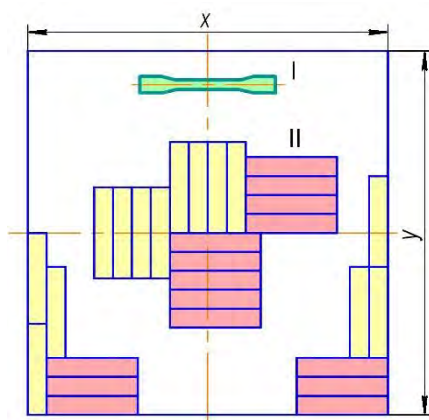


Рис. 2. Схема раскроя судовых листовых элементов для испытания на растяжение: I – форма образцов; II – схема вырезки образцов

Через каждые $N=1,0 \cdot 10^6$ циклов перемен нагрузок производился контроль уровня деформаций в листовых элементах. Затем установку останавливали и производили визуальный осмотр материала элементов для обнаружения возможных трещин, расслаивания стеклоткани и растрескивания клеевой композиции.

Частота свободных колебаний была практически одинакова для всех испытаний листовых элементов и равнялась 34 Гц, что удовлетворительно совпадает со значениями, определенными аналитическим по формулам (1) и (2). Амплитуда колебаний частот находилась при этом в пределах 6...8 мм, что соответствовало величине напряжений на контуре листовых элементов ($\sigma_x = 14$ МПа, $\sigma_y = 6,4$ МПа).

После завершения испытаний определяли изменение характеристик прочности каждого образца после воздействия вибрационных нагрузок. Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» и заключались в определении прочности на разрыв σ_b образцов, вырезанных из «отработанных» композитных элементов.

Предел прочности определялся в результате испытания образцов на разрыв на разрывной машине типа УТС-110М.

Для испытания на разрыв использовались образцах с гладкой, ровной поверхностью без видимых дефектов, имеющих форму двусторонней лопаточки. Разметку заготовок образцов на листовых элементах выполняли по карте раскроя (рис. 2).

Образцы, показанные желтым цветом, использовались для испытаний на основе, розовым цветом – для испытаний по утку.

Кромки образцов обрабатывали на фрезерном станке. Перед испытаниями рабочую часть образцов обмеряли в трех сечениях. По результатам измерений подсчитывали средние значения толщины и ширины образцов и определяли площадь поперечного сечения.

Так как участки листовых элементов из армированного полимерного материала, прилегающие к опорному контуру, практически не подвергались вибрационному нагружению, испытания вырезанных из этих участков образцов дали возможность определить предел прочности «неработавшего» материала элементов.

2. Анализ результатов испытаний

На рис. 3 и 4 показано влияние числа циклов нагружений на предел прочности материала судовых листовых элементов из армированного полимерного материала.

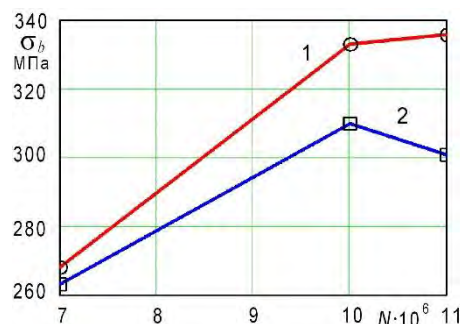


Рис. 3. Влияние числа циклов нагружения на предел прочности материала по основе: 1 – материал «неработавших» участков образца; 2 – материал «отработавших» участков образца

При испытаниях наблюдалось, что армированное полимерное покрытие способно поглощать вибрацию за счет явления внутреннего деформирования, то есть материал покрытия поглощает энергию путем преобразования ее в тепло за счет внутреннего трения. Демпфирование оказывает непосредственное влияние на характер вибрации материала – значительно уменьшает частоту собственных колебаний и, что более важно, снижает амплитуду колебаний при частотах, близких к зоне резонанса.

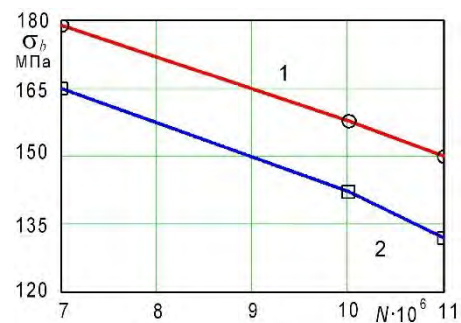


Рис. 4. Влияние числа циклов нагружения на предел прочности материала по утку: 1 – материал «неработавших» участков образца; 2 – материал «отработавших» участков образца

Визуальный осмотр материала элементов показал, что после их испытания не было обнаружено трещин, расслаивания стеклоткани и растрескивания клеевой композиции, а также нарушения связи между стеклянными волокнами и клеевой композицией.

Результаты испытаний образцов, вырезанных из участков листовых элементов, свидетельствуют, что предел прочности «отработавшего» материала всех образцов снизился по сравнению «неработавшего» в зависимости от числа циклов нагружения: при $N = 7 \cdot 10^6$ циклах на 1,9 % по основе и на 7,6 % по утку; при $N = 10 \cdot 10^6$ циклах – на 9,2% и 10,5 % по основе и утку соответственно; при $N = 11 \cdot 10^6$ циклах – на 10,3 % и 9,3 % соответственно.

Заключение

Разработанная экспериментальная установка, методика проведения экспериментов и обработки результатов позволяют проводить оценку влияния вибрационных нагрузок на прочность листовых судовых композиционных элементов.

Установлены эффекты поглощения части энергии вибрации композитами. При этом может изменяться частота собственных колебаний конструкций.

Полученные результаты будут способствовать расширению сферы использования листовых композиционных элементов в местах повышенных вибрационных нагрузок, действующих на судовые конструкции.

Литература

1. Senjanović I., Ančić I., Magazinović G., Alujević N., Vladimir N., Cho D-S. Validation of analytical methods for the estimation of the torsional vibrations of ship power transmission systems // Ocean engineering.. 2019. V.184. Pp. 107-120.
2. Yucel A., Arpacı A. Free and forced vibration analyses of ship structures using the finite element method // Journal of marine science and technology. 2013. V.18. Pp. 324-338.
3. Lin T.R., Pan J., O'Shea P.J., Mechefske C.K. A study of vibration and vibration control of ship structures // Marine structures. 2009. V.22(4). Pp. 730-743.
4. Иванов М.А., Крыжевич Г.Б. Экспериментальное и расчетное исследования влияния гидродинамического демпфирования на общую вибрацию скоростного судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. №67(351). С. 65-70.
5. Николаев Н.И., Мышинский Э.Л., Гриценко М.В. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 84-90.
6. Sit M., Ray C., Biswas D. Stress distribution in the hollow stiffened hybrid laminated composite panels in ship structures under sinusoidal loading // International journal of maritime engineering. 2016. V.158. Pp. A103-A111.
7. Ma S., Mahfuz H. Finite element simulation of composite ship structures with fluid structure interaction // Ocean engineering. 2012. V.52. Pp. 52–59.
8. Chen N-Z, Soares C.G. Reliability analysis of ship hulls made of composite materials under sagging moments // Journal of marine science and technology. 2007. V.12(4). Pp. 263–271.
9. Емельянов М.Д., Соминская Э.В. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №48-49. С. 77-84.
10. Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Напряженное состояние полимерных покрытий, примененных при ремонте судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №3-3(45). С. 37-42.
11. Граков С.А., Зубарев А.В., Бохан В.В., Угренов М.В. Использование композитных материалов в тонкостенных облепленных высоконагруженных судовых валопроводах // Судостроение. 2018. №2(839). С. 50-51.
12. ShuangLi S., Yang J-S., Schmidt R., Wu L-Z., Schröder K-U. Compression and hysteresis responses of multilayer gradient composite lattice sandwich panels // Marine structures. 2021. V.75. 102845.
13. Canales F.G., Mantari J.L. Discrepancy on the free vibration of laminated composite plates coupled to a compressible and incompressible fluid domain // Ocean engineering. 2018. V.167. Pp. 267-281.
14. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Федонюк Н.Н., Яковлев Д.О. Метод расчета рассеяния энергии в конструкциях из гибридных композитов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №11(656). С. 12-24.
15. Богомолов А.А., Егорова Е.Н., Троицкий А.В. Метод математического моделирования при оценке вибропрочности сложных конструкций судового оборудования // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2014. №82(366). С. 161-166.
16. Блехман И.И. О вибрационных динамических материалах и композитах // Доклады Академии наук. 2007. Т.414. №5. С. 618-621.
17. Thomson W.T. Theory of vibration with applications. Boca Raton: CRC Press, 1996. 560 p.
18. Khan A.S., Wang X. Strain measurements and stress analysis, New Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001 247 p.

References

1. Senjanović I., Ančić I., Magazinović G., Alujević N., Vladimir N., Cho D-S. Validation of analytical methods for the estimation of the torsional vibrations of ship power transmission systems. Ocean engineering. 2019. V.184. Pp. 107-120.
2. Yucel A., Arpacı A. Free and forced vibration analyses of ship structures using the finite element method. Journal of marine science and technology. 2013. V.18. Pp. 324-338.

3. Lin T.R., Pan J., O'Shea P.J., Mechefske C.K. A study of vibration and vibration control of ship structures. *Marine structures*. 2009. V.22(4). Pp. 730-743.
4. Ivanov M.A., Kryzhevich G.B. Eksperimental'noe i raschetnoe issledovaniya vliyaniya gidrodinamicheskogo dempfirovaniya na obshchuyu vibratsiyu skorostnogo sudna [Experimental and computational studies of the effect of hydrodynamic damping on the overall vibration of a high-speed vessel] *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. 2012. No67(351). Pp. 65-70.
5. Nikolaev N.I., Myshinsky E.L., Gritsenko M.V. K voprosu otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh tekhnicheskikh sredstv morskikh sudov po parametram vibratsii [On the issue of assessing the technical condition of marine technical means of marine vessels by vibration parameters] *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva*. 2020. No60-61. Pp. 84-90.
6. Sit M., Ray C., Biswas D. Stress distribution in the hollow stiffened hybrid laminated composite panels in ship structures under sinusoidal loading. *International journal of maritime engineering*. 2016. V.158. Pp. A103-A111.
7. Ma S., Mahfuz H. Finite element simulation of composite ship structures with fluid structure interaction. *Ocean engineering*. 2012. V.52. Pp. 52–59.
8. Chen N-Z, Soares C.G. Reliability analysis of ship hulls made of composite materials under sagging moments. *Journal of marine science and technology*. 2007. V.12(4). Pp. 263–271.
9. Emelyanov M.D., Sominskaya E.V. Primenenie kompozitsionnykh materialov pri remonte korpusov morskikh sudov [Application of composite materials in the repair of marine hulls] *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva*. 2017. No48-49. Pp. 77-84.
10. Koryagin S.I., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Napryazhennoe sostoyanie polimernykh pokrytiy, primenennykh pri remonte sudovykh korpusnykh konstruksiy [The stress state of reinforced polymeric coatings used by repair of ship hull structures] *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2019. No3-3(45). Pp. 37-42.
11. Grakov S.A., Zubarev A.V., Bohan V.V., Grinev M.V. Ispol'zovanie kompozitnykh materialov v tonkostennykh oblegchennykh vysokonagruzhennykh sudovykh valoprovodakh [The use of composite materials in thin-walled lightweight high-load marine shaft pipelines] *Sudostroenie*. 2018. No2(839). Pp. 50-51.
12. ShuangLi S., Yang J-S., Schmidt R., Wu L-Z., Schröder K-U. Compression and hysteresis responses of multilayer gradient composite lattice sandwich panels. *Marine structures*. 2021. V.75. 102845.
13. Canales F.G., Mantari J.L. Discrepancy on the free vibration of laminated composite plates coupled to a compressible and incompressible fluid domain. *Ocean engineering*. 2018. V.167. Pp. 267-281.
14. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Fedonyuk N.N., Yakovlev D.O. Metod rascheta rasseyaniya energii v konstruksiyakh iz gibridnykh kompozitov [Method for calculating energy dissipation in hybrid composite structures] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2014. No11(656). Pp. 12-24.
15. Bogomolov A.A., Egorova E.N., Troitsky A.V. Metod matematicheskogo modelirovaniya pri otsenke vibroprochnosti slozhnykh konstruksiy sudovogo oborudovaniya [Mathematical modeling method for assessing the vibration resistance of complex structures of marine equipment] *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. 2014. No82(366). Pp. 161-166.
16. Blechman I.I. O vibratsionnykh dinamicheskikh materialakh i kompozitakh [About vibrational dynamic materials and composites] *Doklady Akademii nauk*. 2007. V.414. No5. Pp. 618-621.
17. Thomson W.T. *Theory of vibration with applications*. Boca Raton: CRC Press, 1996. 560 p.
18. Khan A.S., Wang X. *Strain measurements and stress analysis*, New Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001 247 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Иванович Корягин, доктор технических наук, профессор, директор инженерно-технического института, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Sergey I. Koryagin, Dr.Sci. (Eng), Professor, Director of the Engineering and technology institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Nikolay L. Velikanov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of mechanical engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Oleg V. Sharkov, Dr.Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the Department of engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Поступила в редакцию: 11.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.128

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.005>

Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения

Часть 3 Применение твердотельного моделирования для получения кромок отверстий в сферических участках корпусов

С.А. Русановский¹ e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

¹Филиал Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова

Аннотация. В 3й части статьи рассмотрена методика моделирования разделок в геометрическом и аналитическом представлении. Базой методики является геометрическое моделирование, которое естественным образом позволяет идентифицировать поверхность разделки. По результатам идентификации формируется математическая модель в унифицированном виде. На завершающем этапе выполняется параметризация полученной модели. В качестве примера определено отверстие в сферическом участке корпуса в геометрическом виде и параметрическом уравнении в однородных координатах. Также в статье рассмотрен пример по определению изначального типа обрабатываемой поверхности в контексте предлагаемой методики.

Благодаря модульной структуре методики процесс проектирования технологического комплекса можно начинать с любого его компонента и последовательно понижая неопределенность двигаться к законченному проектному решению. Исходными данными для формирования математической модели проектируемого технологического комплекса являются вид и параметры обрабатываемых поверхностей разделки кромок корпусов объектов подводного кораблестроения.

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

Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges

Part 3 Applying 3d-modeling to opening's bevel in spherical sections of hulls

Sergey A. Rusanovskiy¹ e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

¹Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Abstract. The 3rd part of the article discusses the method of modeling cuts in geometric and analytical representation. The basis of the technique is geometric modeling. Which naturally identifies the cutting surface. Based on the identification results, a mathematical model is formed in a unified form. The final step is to parameterize the resulting model. Also the article discusses an example for determining the initial type of surface to be treated in the context of the proposed technique.

Thanks to the modular structure of the methodology, the process of designing a technological complex can begin with any of its components and consistently reduce uncertainty and move to a complete design solution. Initial data for forming mathematical model of designed technological complex are view and parameters of processed surfaces of opening's bevels of hulls of underwater shipbuilding objects.

Key words: computer aided design systems, shaping, methodology, objects of underwater shipbuilding, pressure hull, welding of flanges, bevel of opening, ruled surface, technological complexes.

Введение (Introduction)

В предыдущих частях 1 [1] и 2 цикла рассмотрены вопросы моделирования разделки кромок отверстий в корпусах подводных судов [2] при варке в них цилиндрического насыщения на основе описания кромок при помощи параметрических уравнений. При автоматизированной обработке кромок отверстий с помощью станков с ЧПУ особый интерес представляет формализация процесса моделирования операций по получению поверхности фаски разделки кромок при помощи стандартных операций, реализуемых в пакетах САПР [3]. Наличие таких процедур позволит создавать наиболее эффективные управляющие программы для обрабатывающих комплексов [4].

1. Методы и Материалы (Methods and Materials)

Опишем принципиальный подход к определению любой рассматриваемой поверхности в формализованном виде на основе матричного математического аппарата и булевых операций используемых в САПР для твердотельного моделирования объектов. В общем виде все обрабатываемые поверхности можно разделить на 2 типа – свободные (не соприкасающиеся с другими деталями) и сопряженные (зависимые от других поверхностей). Поверхность фаски разделки кромок относится к сопряженным поверхностям, так как ее морфологию будет определять свариваемая конструкция (фланец насыщения) в корпус. Фланцы в подобных объектах представляют из себя цилиндр, для размещения которого вырезается часть корпуса,

т.е. вырез под фланец будет представлять из себя цилиндрическое отверстие в корпусе. Для корпусов объектов подводного судостроения, работающих под высоким давлением, применяют поверхности вращения (которые обычно являются сочетанием шаров, торов, конусов, цилиндров), которые имеют большую толщину. Большинство из этих поверхностей могут быть представлены в аналитическом виде.

Таким образом, можно определить отверстие как совокупность пересечений тел с простой геометрией, для которых уже определены стандартные математические описания, которые можно использовать в требуемом виде – каноническом, параметрическом и матричном.

Далее рассмотрим саму поверхность фаски. В поперечных сечениях она образуется прямыми линиями (прямолинейная разделка кромок), что обусловлено действующей технологией постройки. Следовательно, поверхность образуется прямой линией и ее тип – линейчатый. Из технологических соображений угол скоса разделки кромок стремятся выполнять постоянным по периметру отверстия.

В рассматриваемом случае логичным представляется рассмотреть две направляющих: прямолинейную (ось отверстия) и пространственную кривую линию (линия «гребешка» фаски) и угол наклона прямолинейной образующей к плоскости перпендикулярной оси цилиндра (формирует грань фаски на поверхности корпуса). Получаемая таким образом поверхность является линейчатой и относится к классу косых коноидов.

Для моделирования криволинейной образующей по уравнениям линейчатой поверхности в общем виде необходимо решить задачу пересечения цилиндра, задающего положение ввариваемой детали, с обшивкой прочного корпуса. При этом ПК может состоять из цилиндрических, конических и сферических участков.

Принципиальное отличие указанных поверхностей тел от прямого кругового цилиндра заключается в невозможности простого получения тел другими операциями кроме вращения, а цилиндр можно рассмотреть как прямоугольную призму с основанием в виде окружности, что и определяет разницу в методике построения.

2. Результаты (Results)

Рассмотрим получение криволинейной образующей используя булевы операции на сферических поверхностях при условии, что ось отверстия располагается произвольным образом в плоскости, проходящей через ось вращения указанных тел.

Пусть дана сфера $Sp1$, диаметр которой совпадает с наружным диаметром прочного корпуса. Из него вычитаем сферу $Sp2$, диаметр которого совпадает с внутренним диаметром ПК. После первой операции вычитания получаем оболочечную сферу $Sp3$, имеющую толщину ПК. Из полученной оболочки $Sp3$ вычитаем цилиндр $C4$, соответствующий цилиндру насыщения, диаметр которого составляет не более 20% от диаметра оболочки (при указанных соотношениях размеров корпуса и отверстия модель устойчива). В итоге получаем оболочку с требуемым отверстием $Sp5$.

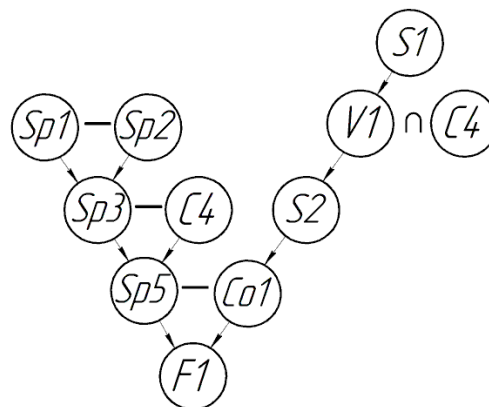


Рис. 1. Увеличенная блок-схема формообразования кромок разделки цилиндрического отверстия в сферической оболочке

Далее определяем плоскость, проходящую через ось OZ сферической оболочки и, например, точку пересечения срединной плоскости оболочки с осью цилиндра и в этой строим плоскую плавную кривую $S1$ между самыми удаленными точками на отверстии в этой плоскости. В целях упрощения задачи выберем форму кривой в виде круговой дуги с центром на оси OZ [5,6]. Очевидно, что форма и положение кривой $S1$ по высоте выреза должны быть согласованы с требованиями нормативных документов к разделке кромок отверстия. Используем далее плоскую кривую $S1$ как образующую для построения поверхности вращения $V1$, которую получим вращением этой кривой относительно оси OZ . По способу получения построенная кривая будет принадлежать к классу торовых поверхностей.

Пересечение поверхности вращения $V1$ и поверхности цилиндра насыщения $C4$ даст нам требуемую криволинейную направляющую $S2$, которая определяет криволинейную направляющую коноида поверхности фаски. Это допущение будет справедливо, если от кривой $S1$ потребовать, чтобы она не выходила за пределы толщины оболочки, центр её кривизны находился внутри оболочки, а начало и конец лежали на границах диаметрального сечения выреза, то кривую $S2$ можно рассматривать как гребешок фасок разделки кромки выреза оболочки под сварку (корень сварного шва).

Пространственная кривая $S2$ далее может быть использована для построения косоугольного коноида $Co1$, имитирующего поверхность фаски разделки кромок (в пределах толщины оболочечной сферы $Sp5$). Вычитание из сферической оболочки с отверстием $Sp5$ косоугольного коноида $Co1$ заканчивает формообразование линейчатой поверхности [9] фаски разделки кромок цилиндрического отверстия в сферическом корпусе под сварку насыщения $F1$.

3. Обсуждение (Discussion)

Заметим, что все геометрические объекты и операции над ними, приведенные в блок-схеме, представленной на рис. 1, достаточно легко реализуются при помощи стандартных операций твердотельного моделирования, реализованных в пакетах САПР (Creo, NX и др.). Однако в этом случае обычно теряется сущность математических преобразований, свойственная аналитическим

методам, что не всегда позволяет оценить точность и корректность полученного результата. Для получения управляющих программ процессами формообразования сопряженных поверхностей при обработке изделий [7,8] при помощи числовых обрабатывающих комплексов идеальным вариантом математической реализации построений, указанных на рис. 1, является язык матричной алгебры в сочетании с булевыми операциями и однородными координатами.

Базовые обозначения величин показаны на рис. 2.

Проведем пошаговое описание данных построений.

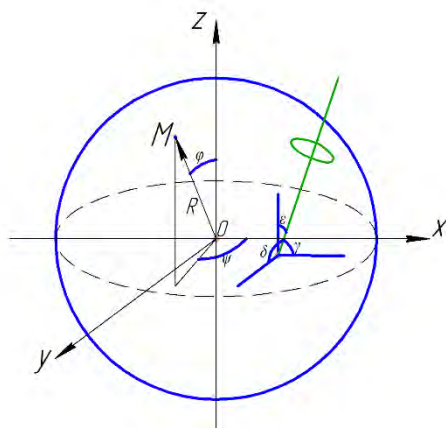


Рис. 2. Общая система координат сферической оболочки и углы наклона оси цилиндра насыщения

1) Получение сфер Sp1 и Sp2

Сфера Sp1, граничная поверхность которой совпадает с внешней поверхностью оболочечной конструкции, в однородных координатах описывается параметрическими уравнениями четвертого порядка в следующем виде

$$[Sp1] = \begin{bmatrix} x(\varphi, \psi, D) \\ y(\varphi, \psi, D) \\ z(\varphi, \psi, D) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D}{2} \cos\varphi \sin\psi \\ \frac{D}{2} \sin\varphi \sin\psi \\ \frac{D}{2} \cos\psi \\ 1 \end{bmatrix}$$

где D – внешний диаметр оболочки,

φ – азимутальный угол (угол между направлением оси OX и проекцией радиус-вектора точки на сфере на собственную координатную плоскость XOY сферы),

ψ – зенитный (полярный) угол (угол между направлением оси OZ и радиус-вектором точки на сфере).

2) Аналогичным способом получаем уравнения для сферы ограниченной внутренней поверхностью оболочечной конструкции, с заменой наружного диаметра D на внутренний D1.

Отметим, что обе эти сферы должны иметь общий центр.

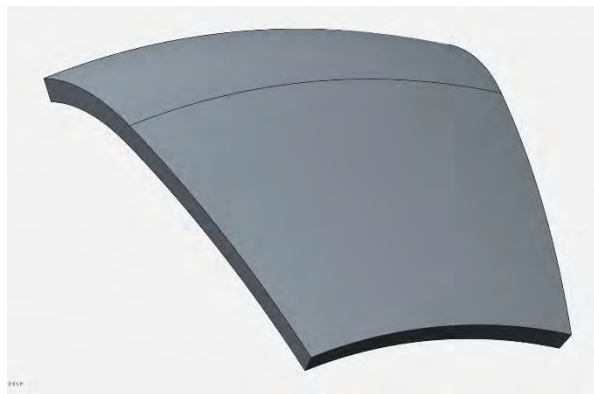


Рис. 3. Оболочечная сфера Sp3

3) Получение оболочечной сферы

Сферическая оболочка получается путем операции пересечения сфер Sp1 и Sp2 и показана на рис. 3.

$$[Sp3] = [Sp1] \cap [Sp2] = \begin{bmatrix} (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \sin\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\psi \\ 1 \end{bmatrix}$$

где D1 – внутренний диаметр сферической оболочки.

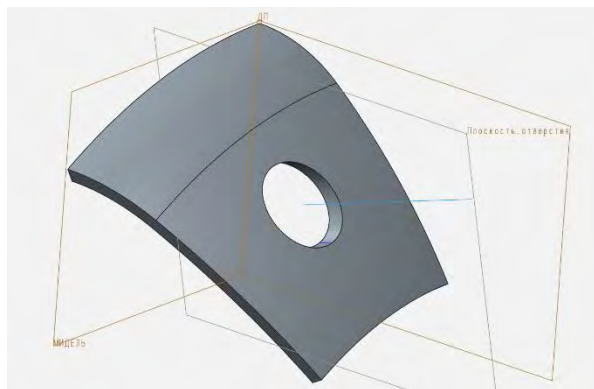


Рис. 4. Оболочечная сфера Sp5 с выполненным отверстием C4

4) Формируем цилиндр насыщения C4, привязывая его к декартовой системе координат OXYZ

$$[C4] = \begin{bmatrix} x(\xi, d_0) \\ y(\xi, d_0) \\ z(h) \\ 1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \frac{d_0}{2} \cos\xi \\ \frac{d_0}{2} \sin\xi \\ h \\ 1 \end{bmatrix}$$

где [A] – стандартная матрица линейно-угловых преобразований координат вида:

$$[A] = [A1][A2][A3][A4][A5][A6],$$

где [A1], ..., [A3] - матрицы переноса вдоль осей координат OX, OY, OZ: В первом варианте требуется, чтобы кривая S1 проходила через верхнюю и нижнюю точки толщины оболочки, что показано на рис. 5.

$$[A1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[A2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & y & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[A3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & z & 1 \end{bmatrix},$$

x, y, z – линейные смещения системы координат ввариваемого в сферическую оболочку элемента относительно начала ее системы координат соответственно по осям OX, OY, OZ .

$$[A4] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[A5] = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[A6] = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 1 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

γ – угол поворота оси симметрии ввариваемого элемента относительно оси OX сферической оболочки,

δ – угол поворота оси симметрии ввариваемого элемента относительно оси OY сферической оболочки,

ε – угол поворота оси симметрии ввариваемого элемента относительно оси OZ сферической оболочки,

ξ – полярный угол, определяющий положение образующей ввариваемого цилиндра относительно его оси,

h – высота ввариваемого элемента.

5) Выполняем отверстие в оболочечной сфере при помощи операции пересечения оболочки и цилиндра насыщения, показанных на рис.4.

$$[Sp5] = [Sp3] \cap [C4] =$$

$$= \begin{bmatrix} (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \sin\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\psi \\ 1 \end{bmatrix} - [A] \begin{bmatrix} \frac{d_0}{2} \cos\xi \\ \frac{d_0}{2} \sin\xi \\ h \\ 1 \end{bmatrix}.$$

6) В границах выреза в оболочечной сфере задаем плоскую кривую $S1$, показанную на рис. 5, и также привязываем ее к системе координат $OXYZ$.



Рис. 5. Плоская плавная кривая $S1$

В однородных координатах параметрические уравнения плоской кривой в виде дуги окружности может быть представлены следующим образом:

$$[S1] = \begin{bmatrix} x(\delta, d_1) \\ y(\delta, d_1) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [A_0] \begin{bmatrix} \frac{d_1}{2} \cos\delta \\ \frac{d_1}{2} \sin\delta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $[A_0]$ – стандартная матрица линейно-угловых преобразований, аналогичная по структуре ранее определенной матрице $[A]$,

$\frac{d_1}{2}$ – радиус плоской кривой $S1$,

δ – азимутальный угол положения текущей точки на кривой $S1$.

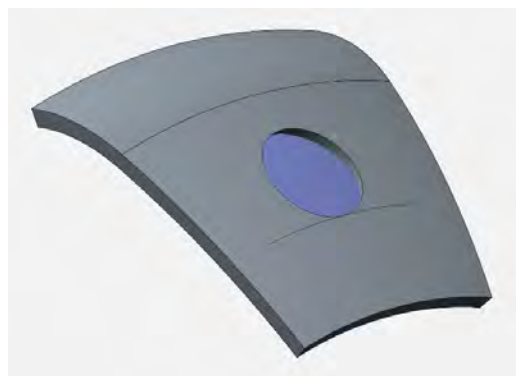


Рис. 6. Поверхность вращения $V1$

7) Вращение плоской кривой $S1$ для получения поверхности $V1$, показанной на рис. 6. Эта операция в однородных координатах описывается параметрическими уравнениями

$$[V1] = \begin{bmatrix} x(\delta, \lambda, d_1) \\ y(\delta, \lambda, d_1) \\ z(\lambda, d_1) \\ 1 \end{bmatrix} = [A_0] \begin{bmatrix} \frac{d_1}{2} \cos\delta \sin\lambda \\ \frac{d_1}{2} \sin\delta \sin\lambda \\ \frac{d_1}{2} \cos\lambda \\ 1 \end{bmatrix},$$

λ – полярный угол вращения кривой $S1$ вокруг оси сферы OZ .

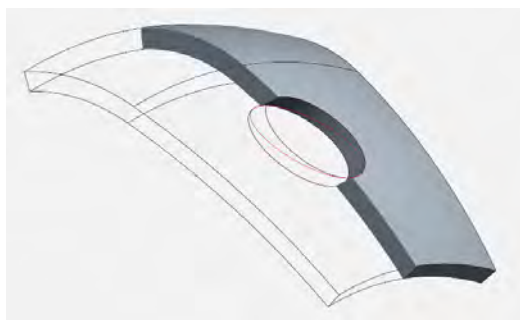


Рис. 7. Пересечение поверхности вращения V1 и поверхности кромки отверстия оболочки C4 и Sp5 - криволинейная направляющая S2

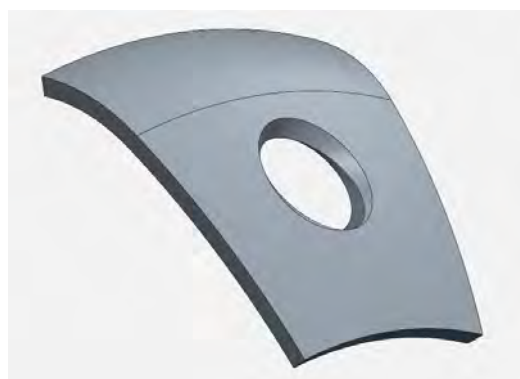


Рис. 8. Оболочечная сфера с подготовленным отверстием линейчатой поверхностью F1

8) Получение пространственной кривой S2, определяющей положение гребешка разделки и показанной на рис. 7.

$$[S2] = [Sp5] \cap [V1]$$

Пересечение двух поверхностей как геометрическое место точек соответствующей кривой (на рисунке 7 отмечено красным) находится через нетривиальное решение системы матричных уравнений:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \sin\varphi \sin\psi \\ (\frac{D}{2} - \frac{D1}{2}) \cos\psi \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [A] \begin{bmatrix} \frac{d_0}{2} \cos\xi \\ \frac{d_0}{2} \sin\xi \\ h \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ [A_0] \begin{bmatrix} \frac{d_1}{2} \cos\delta \sin\lambda \\ \frac{d_1}{2} \sin\delta \sin\lambda \\ \frac{d_1}{2} \cos\lambda \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

Литература

1. Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения / Русановский С.А., Худяков М.П., Черенков Н.И. // Морские интеллектуальные технологии, — 2020. — №1. — том 1. — С. 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006
2. Русановский С. А. Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Вестник Государственного

9) Построение косоугольного коноида Co1

Для построения коноида используется прямолинейная образующая, один конец которой движется вдоль криволинейной направляющей S2, а другой скользит вдоль оси цилиндра насыщения. Параметрические уравнения коноида Co1 представляются в виде

$$[Co1] = \begin{bmatrix} x(u, \xi, \chi) \\ y(u, \xi, \chi) \\ z(u, \chi) \\ 1 \end{bmatrix} = [A_1] \begin{bmatrix} x_{s2}(\xi) + u \sin\chi \cos\xi \\ y_{s2}(\xi) + u \sin\chi \sin\xi \\ z_{s2}(\xi) + u \cos\chi \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$x = [x_{s2}(\xi) + u \cos\chi] \cos\xi,$$

$$y = [y_{s2}(\xi) + u \cos\chi] \sin\xi,$$

$$z = z_{s2}(\xi) + u \sin\chi,$$

где $x_{s2}(\xi)$, $y_{s2}(\xi)$, $z_{s2}(\xi)$ – координаты криволинейной направляющей S2, упорядоченные по углу ξ ,

χ – угол наклона прямолинейной образующей косоугольного коноида к плоскости, перпендикулярной оси цилиндра насыщения,

u – расстояние от произвольной точки M линейчатой поверхности коноида до криволинейной направляющей S2.

10) Удаление фаски и получение готового изделия F1, показанного на рис. 8.

Фаска разделки кромок отверстия под варку цилиндрического насыщения при постоянном угле разделки представляет собой линейчатую поверхность в виде косоугольного коноида.

Заключение (Conclusion)

Проанализированы и выявлены недостатки существующей методики получения геометрии разделки кромок отверстий под сварку при варке в корпус ПЛ цилиндрического насыщения.

Предложена упрощенная методика получения геометрии разделки кромок отверстий под сварку при варке в корпус ПЛ цилиндрического насыщения на основе представления фасок разделки в виде линейчатой поверхности дважды косоугольного цилиндрикоида или косоугольного коноида.

Показана возможность автоматизированного получения геометрии разделки с помощью базового функционала 3D-моделирования современных САПР.

Приведены примеры математического описания результатов трехмерного моделирования элементов геометрии разделки кромок отверстий.

- университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003
3. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В.В. Веселков, М.А. Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — №1(29). — С. 82-89.
 4. Русановский С. А. Проектирование технологических комплексов. Часть 1. Разработка методики проектирования / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Ю.В. Климов // Вестник машиностроения. — 2020. — № 7. — С. 31–35. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-7-31-35
 5. Yang X. Efficient circular arc interpolation based on active tolerance control / X.Yang // Comp.-Aided design, — 2002. — vol. 34. — issue 1. — Pp. 1037–1046.
 6. Park H. Error-bounded biarc approximation of planar curves / H.Park // Comp.-Aided design, — 2004. — vol. 36. — issue 12. — Pp. 1241–1251. DOI: 10.1016/j.cad.2004.01.001.
 7. Yeung M. Curve fitting with arc splines for NC tool path generation / Yeung M, Walton DJ. // Comp.-Aided design, — 1994. — vol.26. — issue 11. — Pp. 845–849.
 8. Qiu H. Optimal circular arc interpolation for NC tool path generation in curve contour manufacturing / Qiu H, Cheng K, Li Y. // Comp.-Aided design, — 1997. — vol.19. — issue 11. — Pp. 751–760.
 9. Кривошапко С. Н. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. — М.: Наука, 2006. — 544 с.

References

1. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Nikolai I. Cherenkov. Metodika modelirovaniya faski otverstij v korpusah ob'ektov podvodnogo korablestroeniya pod vvaruku nasyshheniya [Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges]. Marine intellectual technologies, № 1 part 1, (2020): 28-37. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.006
2. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, and Nikolai I. Cherenkov. Modelirovanie formoobrazovaniya kromok otverstij v korpusah ob'ektov podvodnogo korablestroeniya [Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 10.5 (2018): 993–1003. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.
3. Veselkov, V. V. and M.A. Kobec. Principy realizacii i razvitiya tekhnologii avtomatizirovannogo izgotovleniya korpusnyh konstrukcij [Principles of implementation and development of the technology of automated manufacturing of housing structures]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 1(29) (2015): 82–89.
4. Sergey A. Rusanovskiy, Mikhail P. Khudyakov, Yuriy V. Klimov. Proektirovanie tehnologicheskikh kompleksov. Chast' 1. Razrabotka metodiki proektirovaniya [Design of technological complexes. Part 1. Development of design methodology]. Vestnik mashinostroeniya 7 (2020): 31-35. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-7-31-35
5. Yang, Xunnian. Efficient circular arc interpolation based on active tolerance control. Computer-Aided Design 34.1 (2002): 1037–1046. DOI: 10.1016/S0010-4485(01)00164-6.
6. Hyungjun Park. Error-bounded biarc approximation of planar curves. Computer-Aided Design 36.12 (2004): 1241–1251. DOI: 10.1016/j.cad.2004.01.001.
7. Yeung M, Walton DJ. Curve fitting with arc splines for NC tool path generation. Computer-Aided Design 26.11 (1994): 845-849.
8. Qiu H, Cheng K, Li Y. Optimal circular arc interpolation for NC tool path generation in curve contour manufacturing. Computer-Aided Design 19.11 (1997): 751-760.
9. Krivoshapko, S. N. and V. N. Ivanov and S. M. Halabi. Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informaciya k raschetu na prochnost' tonkih obolochek [Analytical surfaces: 500 surface geometry materials and thin shell strength analysis]. M.: Nauka, 2006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Поступила в редакцию: 05.12.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 629.12.001

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.006>

Реализация общих принципов формирования информационной среды для технического обслуживания и ремонта судовых механизмов в Электронном паспорте изделия

Е.Г. Бурмистров¹ e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru, Е.А. Давыдов¹ e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru,
А.Б. Корнев¹ e-mail: kornev@vgavt-nn.ru, Е.П. Роннов¹ e-mail: eronnov@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. В статье рассматриваются принципы формирования информационной среды обслуживания судовых механизмов. Показывается перспективность разработки для этих целей и ведения с актуализацией на всех основных этапах жизненного цикла изделия его Электронного паспорта. Обосновывается структура паспорта, включающая три основных составляющих: 1. Состояние изделия; 2. Эксплуатационный журнал; 3. История изделия и структура обслуживающей такой паспорт базы знаний, включающей в свою очередь следующие основные группы данных: 1) общие данные; 2) данные для принятия решений на этапе ремонта; 3) критерии для принятия решений на этапе эксплуатации; 4) регламенты. Отмечается, что обеспечение действительности данных Электронного паспорта должен осуществляться через единый Регистрационный центр, функции которого сводятся к проверке наличия регистрационных данных и их целостности, хранению последних действительных копий электронных паспортов изделий и хранению данных о этих паспортах.

Ключевые слова: информационная среда обслуживания изделия, электронный паспорт изделия, трафик данных, регистрационный центр

Implementation of the general principles of creating an information environment for the maintenance and repair of ship mechanisms in the Electronic Product Passport

Evgeny G. Burmistrov¹ e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru, Evgeny A. Davydov¹ e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru,
Andrey B. Kornev¹ e-mail: kornev@vgavt-nn.ru, Evgeny P. Ronnov¹ e-mail: eronnov@mail.ru

¹Volga state university of water Transport

Abstract. The article deals with the principles of formation of the information environment for the maintenance of ship mechanisms. The prospects of development for these purposes and maintenance with updating at all main stages of the product life cycle of its electronic passport are shown. The structure of the passport, which includes three main components, is justified: 1. Product status; 2. Operational log; 3. Product history and structure of the knowledge base serving such a passport, which in turn includes the following main data groups: 1) general data; 2) data for decision-making at the repair stage; 3) criteria for decision-making at the operational stage; 4) regulations. It is noted that ensuring the validity of Electronic Passport data should be carried out through a single Registration Center, whose functions are limited to checking the availability of registration data and their integrity, storing the latest valid copies of electronic product passports and storing data on these passports.

Keywords: product service information environment, electronic product passport, data traffic, registration center

Введение

На необходимость формирования информационной среды не только на этапе проектирования, но и на последующих этапах жизненного цикла (ЖЦ) изделий, указывают многие авторы. Так в работах [1, 2] формирование информационной среды для технического обслуживания и ремонта изделий определяется как одно из ключевых условий модернизации судоремонтных предприятий и их устойчивого развития. Авторы работ [3-5] также связывают создание полномасштабной информационной системы управления судоремонтом с формированием информационной среды изделий. В работах [6-8] обосновывается необходимость электронной паспортизации изделий судостроения, как инструмента PLM. Примеры можно продолжать...

Общие принципы формирования информационной среды, в целом разработаны достаточно полно. Однако, на уровне их практической реализации возникает множество

проблем. В частности, успешность функционирования информационной системы обслуживания судовых механизмов и отдельных их элементов (деталей) во многом определяется рациональностью структуры данных [7]. Формат данных должен быть не только удобным для использования программными продуктами, но и для передачи по спутниковым каналам с ограниченным или затруднённым трафиком, а так же для хранения и защиты самих данных.

Для создания структуры данных важнейшей задачей является определение структуры самой автоматизированной системы. Как представляется, она может быть представлена тремя программно-аппаратными комплексами:

1. На судне: Программно-аппаратный комплекс для первичного сбора и анализа данных.

2. В офисе судоходной компании: Система управления жизненным циклом изделия в рамках системы управления предприятием (ERP+PDM-система управления данными об изделии.)

3. На судоремонтном предприятии:

Программный комплекс принятия решений на основе моделирования процессов износа (повреждений поверхности) и процессов восстановления поверхности (СППР при ремонте + САПР ТП ремонта).

Решение указанной задачи является одним из инструментов достижения цели – создания комплексной системы управления данными об изделии для оптимизации связанных с этим изделием процессов при эксплуатации, техническом менеджменте, ремонте для продления ресурса, утилизации. Другими словами, данные о состоянии конкретного элементарного или сложного изделия должны вноситься в базу данных изделия (формируемую при его проектировании) как на этапе его эксплуатации (при помощи персонала или поступать непосредственно с датчиков) так и на этапе технического обслуживания и ремонта и использоваться для принятия решений на каждом из этапов.

Организацию комплекса с такой структурой, можно реализовать путём создания единой базы данных об изделии – Электронного паспорта изделия (ЭПИ) – расположенной на сервере, находящемся непосредственно в офисе судоходной компании. Однако, ряд факторов, таких как юридическая разделённость (судоремонтное предприятие может не входить в состав судоходной компании), неустойчивость существующих систем связи в силу возможности нахождения судна в отдалённых частях земного шара (в т.ч. в приполярных и полярных районах), делают этот вариант неприменимым [2].

Кроме того, информация об изделии должна иметь отношение к самому изделию, а не к предприятию или организации-собственнику этого изделия. То есть, при смене владельца предприятия информация о состоянии изделия должна быть легко доступна новому владельцу.

Принцип организации информации

Исходя из приведённых доводов, авторами разработан принцип организации данных, основанный на двух типах информации: переносимой и статической.

1. Переносимая информация представляет собой совокупность файлов баз данных, каждый из которых является носителем информации о конкретной уникальной детали (или изделии). То есть, информация о текущем состоянии детали, истории её ремонтов, её особенностях, сводится в отдельную базу данных – ЭПИ. ЭПИ может быть использован любой системой управления путём интегрирования в её базу данных или присоединения к ней в качестве документа, быть передан непосредственно на любое предприятие, быть передан без сбоев по неустойчивому каналу с помощью файлового протокола.

2. Статическая информация представляет собой базу знаний, с помощью которой происходит интерпретация и модификация данных ЭПИ. Информация, входящая в состав такой базы знаний носит справочный характер. В отличие от ЭПИ (полный доступ к которому может иметь только то подразделение, которое в данный момент осуществляет эксплуатацию/ТО/ремонт/хранение изделия), возможность доступа к базе знаний должна

существовать в любой момент времени. Право модерации и актуализации данной базы может иметь только ограниченный круг лиц с соответствующим уровнем допуска.

Таким образом, ЭПИ включает минимальную информацию о состоянии каждой конкретной детали в зашифрованном виде – содержит только идентификаторы типов процессов, оказывавших влияние на изделие и их числовые параметры. Названия же и полные описания этих процессов содержатся в базе знаний.

Расшифровка (интерпретация) ЭПИ осуществляется с помощью программного интерфейса с использованием базы знаний (Рис. 1).



Рис. 1. Интерпретация Электронного паспорта изделия

Изменение (модификация данных) может осуществляться как лицом, принимающим решение (ЛПР) с помощью программной оболочки, так и поступать с датчиков.

Структура информации

Структура ЭПИ. Для определения структуры ЭПИ необходимо составить представление обо всём спектре данных, которые отражают состояние изделия. Для принятия адекватного решения об эксплуатации, ТО или ремонте изделия на основе ЭПИ недостаточно иметь только данные о геометрических изменениях поверхности (деформациях, повреждениях) или изменении характеристик изделия. Необходимо знать причины возникновения этих изменений [6, 7].

Состояние изделия в общем случае определяется двумя аспектами: 1) эксплуатацией изделия; 2) выполненными ремонтами (так как технологии ремонта могут значительно влиять на характеристики изделия) [7].

Таким образом, можно выделить три основных составляющих ЭПИ:

1. Состояние изделия (включает в себя общие идентификационные данные, общие данные о конкретной детали, данные об изменении физических и геометрических параметров и т.п.);

2. Эксплуатационный журнал (содержит данные об эксплуатации (даты, типы и результаты проверок, результаты автоматического мониторинга (информация с датчиков) и др.);

3. История изделия (данные дефектации, даты ремонтов, применённые технологии ремонтов, постремонтные характеристики и т.п.).

ЭПИ должен иметь прозрачную иерархическую структуру. ЛПР должно получать подробную информацию о любом событии (плановая проверка, внеплановая проверка, отказ, ремонт) когда-либо оказывавшем влияние на состояние изделия (Рис. 2).

Структура базы знаний. Так как ЭПИ в конечном итоге является лишь совокупностью кодированных данных и связей, база знаний должна содержать всю необходимую для его расшифровки информацию. Но интерпретация ЭПИ – не единственная её функция. Справочная информация для изменения ЭПИ ЛПР (посредством специализированных программ) или использования для управления работой оборудования (учёта при эксплуатации оборудования его состояния, приобретённых в результате ремонтов свойств) так же должна входить в состав базы знаний.

Можно выделить четыре основные группы данных базы знаний:

1) **общие данные** (требующиеся на любом этапе жизненного цикла изделия) – каталоги объектов (деталей, изделий) и повреждений;

2) **данные для принятия решений на этапе ремонта:** технологии ремонта;

3) **критерии для принятия решений на этапе эксплуатации** – рекомендации по эксплуатации, критерии для принятия решений о выводе из эксплуатации для последующего ремонта, критерии для принятия решений о списании;

4) **регламент:** юридические нормы и правила осуществления деятельности, связанной с эксплуатацией и ремонтом изделия.

Структура базы знаний представлена на рис. 3.

Представленная структура информации позволяет реализовать прозрачную систему обмена данными об объекте. Исчерпывающая информация о состоянии изделия содержится в кратком закодированном виде, обеспечивая возможность передачи всех необходимых данных для принятия адекватных решений на любом этапе его ЖЦ, при любом качестве связи между судном, офисом судоходной компании, судоремонтным предприятием. То есть, ЭПИ является аккумулятором данных о состоянии изделия на протяжении всего его ЖЦ. Он способствует повышению качества принятия решений. Их результаты сохраняются в ЭПИ и используются в дальнейшем для принятия последующих решений.

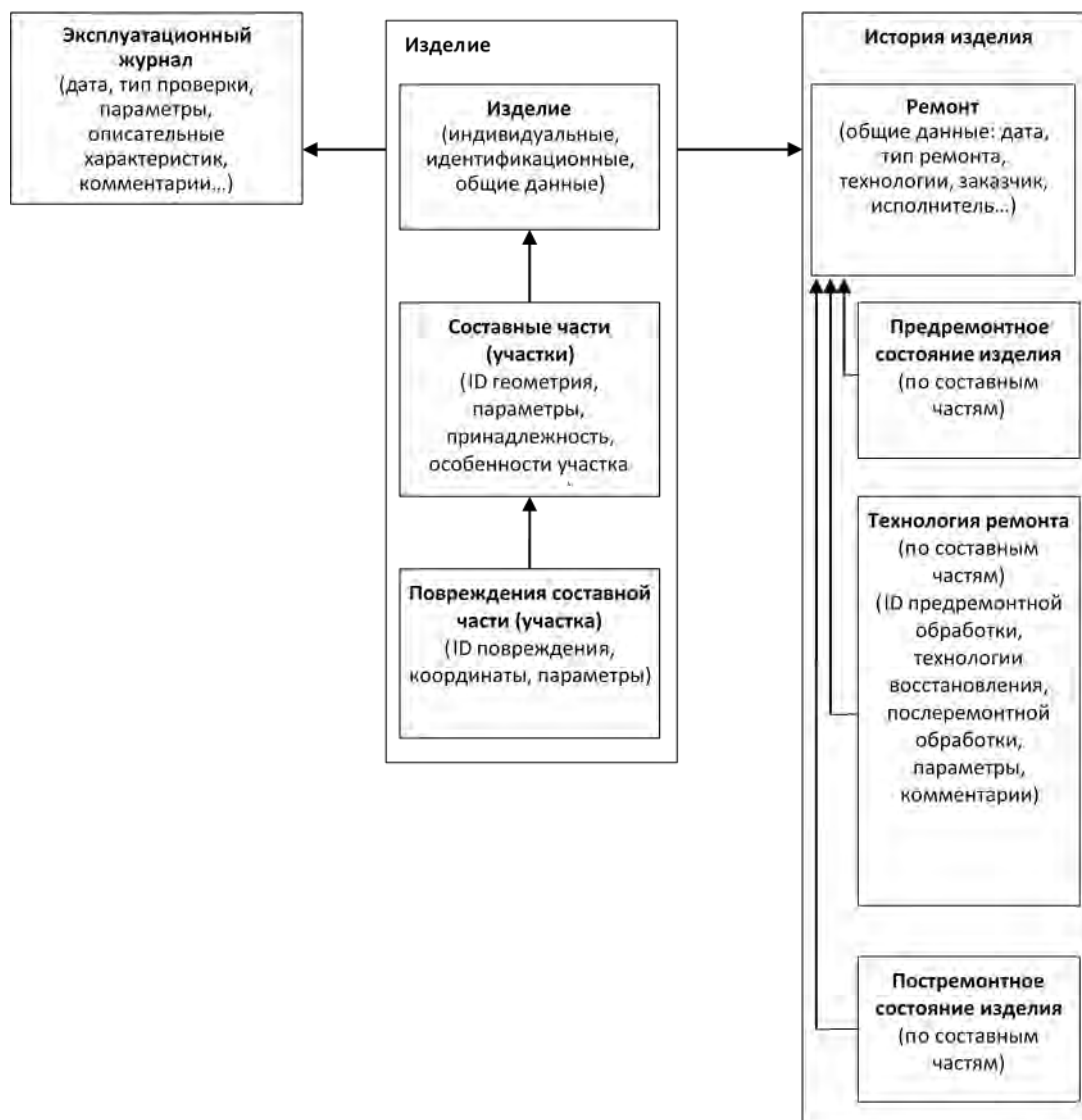


Рис. 2. Иерархическая структура Электронного паспорта изделия



Рис. 3. Структура базы знаний системы обслуживания судовых механизмов

Модули поддержки принятия решений на основе данных ЭПИ и базы знаний уменьшают зависимость качества принятия решений от личных качеств ЛППР (квалификации, степени мотивированности и др. [9]).

Обеспечение действительности данных

Принцип действия. Очевидным недостатком такой системы организации данных является возможность дублирования ЭПИ. Один и тот же ЭПИ может одновременно использоваться в двух и более местах и одновременно несколькими пользователями. Это ставит под сомнение уникальность ЭПИ, а, следовательно, и достоверность заложенной в нём информации. Следовательно, для успешного функционирования системы, необходимо создать систему обеспечения уникальности ЭПИ.

Очевидно, что во избежание дублирования ЭПИ необходимо исключить его передачу одновременно двум и более участникам системы. То есть, весь трафик ЭПИ должен осуществляться через единого посредника – регистрационный центр (РЦ).

Идея РЦ сводится к тому, что ЭПИ может считаться действительным и использоваться для принятия решений относительно изделия только в том случае, если после использования его одним из субъектов, в нём поставлена отметка о прохождении через РЦ.

Упрощенно этот принцип можно представить следующим образом: в начале использования ЭПИ (регистрации по месту эксплуатации) и после окончания работы, в нём делается отметка субъекта «паспортообмена» – подразделения, использовавшего ЭПИ для принятия решений относительно объекта (изделия). После этого, паспорт пересылается в РЦ с указанием адресата. После соответствующей отметки об актуальности ЭПИ (по результатам проверки наличия эксплуатационных отметок, целостности файла и т.п.), ЭПИ отправляется адресату, где система, получившая его, осуществляет проверку наличия отметки РЦ после отметки о прекращении текущего использования ЭПИ. При отсутствии такой отметки ЭПИ считается не действительным.

Функции Регистрационного центра. Таким образом, можно выделить две важные функции РЦ:

- 1) проверка наличия регистрационных данных;
- 2) проверка целостности файла.

Наряду с основными, можно выделить несколько дополнительных функций, повышающих достоверность данных ЭПИ:

- а) хранение последних действительных копий ЭПИ;
- б) хранение данных об ЭПИ (дата создания, причина создания, кому принадлежит право на внесение изменений в настоящий момент, место нахождения ЭПИ и т.п.).

Заключение

Разработка и ведение ЭПИ может способствовать реализации принципов формирования информационной среды для технического обслуживания и ремонта как судовых механизмов в целом, так и отдельных их элементов.

Принцип организации информации в ЭПИ должен основываться на двух типах информации: переносимой и статической. ЭПИ должен иметь прозрачную иерархическую структуру и включать три основных составляющих – состояние изделия; эксплуатационный журнал; история изделия.

Структура обслуживающей ЭПИ базы знаний должна включать: общие данные; данные для принятия решений на этапе ремонта; критерии для принятия решений на этапе эксплуатации и регламент.

Обеспечение действительности данных (их трафик) должен осуществляться через единый РЦ, функциями которого должны являться: проверка наличия регистрационных данных и их целостности; хранение последних действительных копий ЭПИ; хранение данных об ЭПИ.

Таким образом, создание и внедрение ЭПИ может решить ряд важных проблем при формировании информационной среды для технического обслуживания и ремонта изделий – обеспечение рациональности структуры данных, их сохранности и поддержки в актуализированном состоянии.

Литература

1. Малыгин А.Н. Модернизация предприятий судостроения и судоремонта на основе внедрения автоматизированных информационных технологий // Экономические науки (Economics Juvenis scientia) 2017 №7. – С. 26-29.
2. Голубев С.С., Чеботарев С.С. Информационные технологии как ключевой механизм устойчивого развития оборонных промышленных предприятий в современных условиях // Экономические стратегии. - 2018. - т. 20. -№ 3 (153). -С. 68-81.
3. Рогулин А.Г., Токликишвили А.Г. Использование компьютерных технологий в управлении и организации производства в судоремонте // Международный научный журнал «Инновационная наука». – №7/2015. – С. 58-61.
4. Управление судоремонтом - задачи решения TRIM // Спец-Тек. URL: <http://www.trim.ru/content/view/270/105> (дата обращения 04.03.21).
5. Белоусова Т.И. Проблемы внедрения информационных технологий на предприятиях судоремонта // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2010, №22. – С. 62-69.
6. Захарова, В.В. Инновационный подход к организации и планированию судоремонтных работ на специализированных предприятиях и в судоходных компаниях // Морские интеллектуальные технологии. – 2013. – №3. – С. 50–54.
7. Бурмистров Е.Г., Зяблов О.К., Роннов Е.П. Комплексная автоматизированная система технологической подготовки судоремонтного производства // Морские интеллектуальные технологии. – 4(42) Т. 2 2018 С. 92-97.
8. Волков В.И., Голубев С.С., Щербakov А.Г. Цифровая трансформация как новый формат инновационно-технологической политики, реализуемой на предприятиях ОПК // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. - 2018, № 3. - С. 22-31.
9. S. Golubev, V. Volkov, A. Shcherbakov, V. Sekerin, A. Gorokhova. Manpower Support for Digital Technology Implementation Processes in Industrial Enterprises // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).-2019. Vol. 8. Issue 3.- P. 414-420.

References

1. Malygin A. N. Modernization of shipbuilding and ship repair enterprises based on the introduction of automated information technologies // Ekonomicheskie nauki (Economics Juvenis scientia) 2017 No. 7. - pp. 26-29.
2. Golubev S., Chebotarev S. Information technologies as a key mechanism for sustainable development of defense industrial enterprises in modern conditions // Economic strategies. -2018. - t. 20. -№ 3 (153). - Pp. 68-81.
3. Rogulin A. G., Toklikishvili A. G. The use of computer technologies in the management and organization of production in ship repair // International Scientific Journal "Innovative Science". – No. 7/2015. - p. 58-61.
4. Ship Repair Management-TRIM solution tasks//Spec-Tech. URL: <http://www.trim.ru/content/view/270/105> (accessed 04.03.21).
5. Belousova T. I. Problems of introduction of information technologies at ship repair enterprises // Scientific works of Dalrybvtuz. - 2010, No. 22. - pp. 62-69.
6. Zakharova, V. V. Innovative approach to the organization and planning of ship repair works at specialized enterprises and in shipping companies // Marine intelligent technologies. - 2013. - No. 3. - p. 50-54.
7. Burmistrov E. G., Zyablov O. K., Ronnov E. P. Complex automated system of technological preparation of ship repair production // marine intelligent technologies. – 4(42) Vol. 2, 2018 pp. 92-97.
8. Volkov V. I., Golubev S. S., Shcherbakov A. G. Digital transformation as a new format of innovative and technological policy implemented at the enterprises of the defense industry // Scientific Bulletin of the military-industrial complex of Russia. -2018. - No. 3. - pp. 22-31.
9. S. Golubev, V. Volkov, A. Shcherbakov, V. Sekerin, A. Gorokhova. Manpower Support for Digital Technology Implementation Processes in Industrial Enterprises // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).-2019. Vol. 8. Issue 3.- P. 414-420.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Геннадьевич Бурмистров, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603050, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Evgeny G. Burmistrov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of ship design and technology of ship construction, Volga state university of water transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603050, e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Евгений Александрович Давыдов, аспирант кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603050, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru

Evgeny A. Davydov, graduate student of the Department of ship design and technology of ship construction, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603050, e-mail: kaf_ptps@vsuwt.ru

Андрей Борисович Корнев, кандидат технических наук, проректор по научной и инновационной деятельности Волжский государственный университет водного транспорта, 603050, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kornev@vgavt-nn.ru

Евгений Павлович Роннов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603050, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: eronnov@mail.ru

Andrey B. Kornev, Ph.D. (Eng), Vice-Rector for Research and Innovation of the Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova str., Nizhny Novgorod, 603050, e-mail: kornev@vgavt-nn.ru

Evgeny P. Ronnov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Ship Construction, Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603050, e-mail: eronnov@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.12.2020

Принята к публикации: 15.04.2021

УДК 621.914

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.007>

Профилирование червячной фрезы для нарезания внутренней цилиндрической резьбы

Е.В. Глушко¹ e-mail: eglushko2006@mail.ru, Н.Т. Морозова¹ e-mail: moronin56@mail.ru,
Ю.Я. Фершалов¹ e-mail: fershalovjuriy@mail.ru, О.С. Портнова¹ e-mail: olesya.portnova@mail.ru

¹ Дальневосточный федеральный университет

Аннотация. Резьба используется во многих механизмах и достаточно часто для разъемных соединений деталей судовых машин. Для повышения долговечности внутренней цилиндрической резьбы и производительности процесса ее нарезания предлагается новая методика «профилирования червячной фрезы для нарезания внутренней цилиндрической резьбы методом огибания. В данной статье приведено аналитическое определение сопряженных профилей цилиндрической внутренней резьбы и инструмента. Рассматривается метод профильных нормалей для профилирования червячной фрезы при нарезании внутренней резьбы способом огибания, основанный на применении теории матриц. Червячная фреза в осевом сечении имеет конкретный криволинейный профиль, для его получения необходимо знать расчетные зависимости торцового профиля резьбы, и уравнения ее винтовой поверхности и осевого профиля. Для возможности образования витков резьбы необходимы определенные зависимости скорости резанья фрезы и резьбы, а для формирования внутренней резьбы - ее поверхность должна набегать на зубья червячной фрезы. Эти задачи решены с помощью разработанной системы уравнений для изготовления фрез при нарезании внутренней цилиндрической резьбы способом огибания методом профильных нормалей. Расчетный механизм профилирования инструмента - фрезы для нарезания цилиндрических внутренних резьб – может применяться для формообразования конических внутренних резьб.

Ключевые слова: внутренняя резьба, червячная фреза, метод профильных нормалей, торцовый профиль резьбы, способ огибания, витки резьбы, скорость резанья.

Hob cutter shaping for internal straight thread

Elena V. Glushko¹ e-mail: eglushko2006@mail.ru, Nina T. Morozova¹ e-mail: moronin56@mail.ru,
Yuriy Ya. Fershalov¹ e-mail: fershalovjuriy@mail.ru, Olesya S. Portnova¹ e-mail: olesya.portnova@mail.ru

¹ Far Eastern Federal University

Abstract. Threads are used in many mechanisms and frequently in detached connections of marine engines elements. The new technique of hob cutter shaping for internal straight thread is proposed in order to increase durability of the internal cylindrical thread and to improve its cutting performance process. The article gives analytical definition of conjugate profiles of internal straight thread and of a tool. It also deals with the method of profile normals for shaping hob cutter whilst cutting the internal thread by enveloping. The method applies the matrix theory. There is some curved profile in the hob cutter axial section. In order to obtain that profile, it is necessary to know the calculated dependence of a thread transverse profile and its helical surface and axial profile equation. Special dependences of thread speed range and cutting are required to produce turns of the thread. To form internal thread – its surface is to slide on cutter teeth. All the mentioned tasks can be solved by the system of equations for cutters manufacture with cutting internal straight thread applying enveloping with the method of profiles normals. The calculation mechanism for shaping the tool – the hob cutter for internal straight threads – can be used for making internal taper threads.

Key words: internal thread, hob cutter, method of profile normals, thread transverse profile, enveloping, thread turns, speed range.

Введение

Подавляющее большинство разъемных соединений у судовых машин и механизмов выполнены в виде резьбовых соединений. Именно поэтому улучшение технологии изготовления резьбы продолжается практически непрерывно. В качестве примера можно привести активную работу, проводимую в этом направлении Мальковым О.В. [7], Кексиным А.И. [8].

В представляемой работе изложена методика профилирования червячных фрез методом профильных нормалей [1], для нарезания внутренней резьбы, используемой в судовой технике: трубопроводах, соединительных муфтах, запорной арматуре.

Условия при нарезании резьбы следующие: оси изделия и фрезы – параллельны, подача фрезы – радиальная. Абсолютные движения изделия и фрезы – вращения вокруг своих осей.

Задача состоит в нахождении огибающей по заданной огибаемой поверхности изделия. Уравнение зацепления составляется кинематическим методом. Определение скорости резанья возникающей при изготовлении резьбы червячной фрезой. Процесс резьбофрезерования внутренней резьбы возможен будет только при условии, если имеет место арифметическая разность линейных скоростей резьбы V_1 и фрезы V_2 .

Использование метода профильных нормалей для проектирования внутренней резьбы

Системы координат, используемые в работе:

- система $S_1(x_1, y_1, z_1)$ связана с поверхностью изделия (резьбы);
- система $S_2(x_2, y_2, z_2)$ связана с поверхностью фрезы;
- система $S_3(x_3, y_3, z_3)$ – система координат, в которой определяется профиль винтовой

поверхности фрезы. Расположение системы координат приведено на рисунке 1.

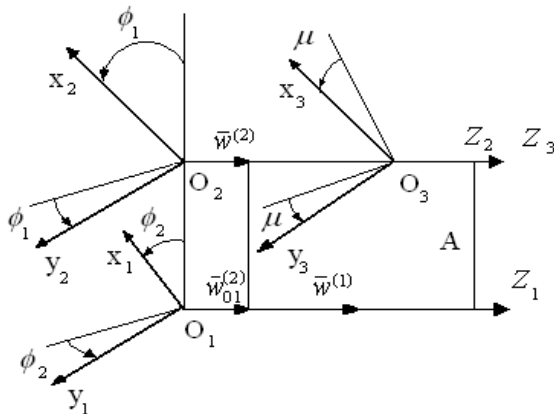


Рис1 Схема расположения системы координат

Уравнение поверхности изделия (резьбы) задано в системе S_1 . Ось z_1 совпадает с осью изделия. Уравнение правой архимедовой винтовой поверхности имеет вид:

$$\begin{cases} x_1 = u \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\vartheta) \\ y_1 = u \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\vartheta) \\ z_1 = P_1 \cdot \vartheta - u \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

где α – половина угла профиля резьбы;
 u – линейный параметр винтовой поверхности изделия, отсчитывается от оси резьбы;
 ϑ – угловой параметр винтовой поверхности изделия, отсчитывается от оси x_1 ;
 P_1 – винтовой параметр изделия.

В качестве примера рассматривается профилирование фрезы для нарезания треугольной или трапециевидальной резьбы.

Рассматриваем сечение поверхности изделия плоскостью $z_1 = 0$ в точке взаимоигибаемых профилей вектора скорости относительного движения перпендикулярен вектору нормали, т.е.

$$\bar{n}_1 \cdot V_1^{(12)} = 0 \quad (2)$$

где \bar{n}_1 – вектор нормали;
 $V_1^{(12)}$ – вектор относительной скорости.

Приведем вектор $\bar{\omega}^{(2)}$ к точке O_1 . В результате приведения получим вектор $\bar{\omega}^{(2)}$ и вектор – момент $\bar{m}_1^{(12)} = \bar{A} \cdot \bar{\omega}^{(2)}$.

Через ω обозначены угловые скорости вращения изделия и фрезы.

Вектор скорости относительного движения определяется из выражения

$$\bar{V}_1^{(12)} = \bar{V}_1^{(1)} - \bar{V}_2^{(2)} = (\bar{\omega}^{(1)} - \bar{\omega}_{01}^{(2)}) \cdot \bar{r}_1 + \bar{\omega}^{(2)} \cdot \bar{A}, \quad (3)$$

где $\bar{\omega}^{(1)} = \omega^{(1)} \cdot \bar{k}$;
 $\bar{\omega}^{(2)} = \omega_{01}^{(2)} \cdot \bar{k}$;
 $\bar{A} = A \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \bar{i}_1 - A \cdot \sin(\varphi_1) \cdot \bar{j}_1$;
 $\bar{r}_1 = x_1 \cdot \bar{i}_1 + y_1 \cdot \bar{j}_1$.

Вводя $\omega^{(2)} = \omega^{(1)} \cdot i_{21}$ и полагая $\omega^{(1)} = 1$ рад/сек, найдем, используя математические формулы Эйлера, значения проекций относительной скорости $V_1^{(12)}$ – на оси координатной системы: S_1

$$\begin{cases} V_{x1}^{12} = -y_1 \cdot (\omega^{(1)} - \omega^{(2)}) + A \cdot \omega^{(2)} \cdot \sin(\varphi_1) \\ V_{y1}^{12} = x_1 \cdot (\omega^{(1)} - \omega^{(2)}) + A \cdot \omega^{(2)} \cdot \cos(\varphi_1) \\ V_{z1}^{12} = 0 \end{cases}$$

Или

$$\begin{cases} V_{x1}^{12} = -y_1 \cdot (1 - i_{21}) + A \cdot i_{21} \cdot \sin(\varphi_1) \\ V_{y1}^{12} = x_1 \cdot (1 - i_{21}) + A \cdot i_{21} \cdot \cos(\varphi_1) \\ V_{z1}^{12} = 0. \end{cases}$$

Нормаль \bar{n}_1 перпендикулярна плоскости, содержащей векторы

$$\frac{\partial \bar{r}_1}{\partial u}, \quad \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial \vartheta}, \quad \text{т.е.} \quad \bar{n}_1 = \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial u} \cdot \frac{\partial \bar{r}_1}{\partial \vartheta}$$

В проекциях на оси координат системы S_1 с учетом (1) имеем:

$$\begin{cases} n_{x1} = P_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\vartheta) + u \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\vartheta) \\ n_{y1} = -P_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\vartheta) + u \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\vartheta) \\ n_{z1} = u \cdot \cos^2(\alpha). \end{cases}$$

Учитывая значения проекций векторов и уравнение зацепления (2) приводим к виду:

$$f(u, \vartheta, \varphi_1) = [-u \cdot (1 - i_{121}) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \vartheta + A \cdot i_{21} \cdot \sin \varphi_1] \cdot [P_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\vartheta) + u \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\vartheta)] + [u(1 - i_{21}) \cdot \cos \alpha \cdot \cos \vartheta + A \cdot i_{21} \cdot \cos \varphi_1] \cdot (u \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin \vartheta - P_1 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \vartheta) = 0 \quad (3)$$

При решении уравнения зацепления (3) поступаем следующим образом: при фиксированном параметре обкатки φ_1 , задаваясь линейным параметром u , определяем значение углового параметра ϑ . Уравнение сопряженного профиля фрезы в сечении $z_2 = z_1 = 0$ имеет вид:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + y_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - A \cdot \cos(\varphi_2) \\ y_2 = x_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + y_1 \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - A \cdot \sin(\varphi_2) \\ z_2 = z_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Для получения винтовой поверхности фрезы сообщаем ее торцовому профилю (4) винтовое движение с винтовым параметром P_1 и угловым параметром μ . В итоге находим:

$$\begin{cases} x_3 = x_2 \cdot \cos(\mu) + y_2 \cdot \sin(\mu) \\ y_3 = -x_2 \cdot \sin(\mu) + y_2 \cdot \cos(\mu) \\ z_3 = z_2 - P_1 \cdot \mu \end{cases} \quad (5)$$

Направление винтовой линии на фрезе совпадает с направлением винтовой линии на изделии. Поэтому винтовые параметры P_1 и P_2 имеют одинаковый знак.

Уравнение осевого профиля резьбы находим в сечении винтовой поверхности (5) плоскостью $x_3 = 0$. Это уравнение имеет вид:

$$\begin{cases} tg(\mu) = -\frac{x_2}{y_2} \\ y_3 = -x_2 \cdot \sin(\mu) + y_2 \cdot \cos(\mu) \\ z_3 = z_2 - P_2 \cdot \mu \end{cases} \quad (6)$$

Определение скорости резанья внутренней резьбы

При рассмотрении кинематики станочного зацепления для внутреннего резьбофрезерования, нарезаемая поверхность резьбы набегаем на зубья червячной фрезы. В связи с этим передняя поверхность зуба фрезы «перевернута» – обращена

в сторону, обратную направлению вращения фрезы рис.2.

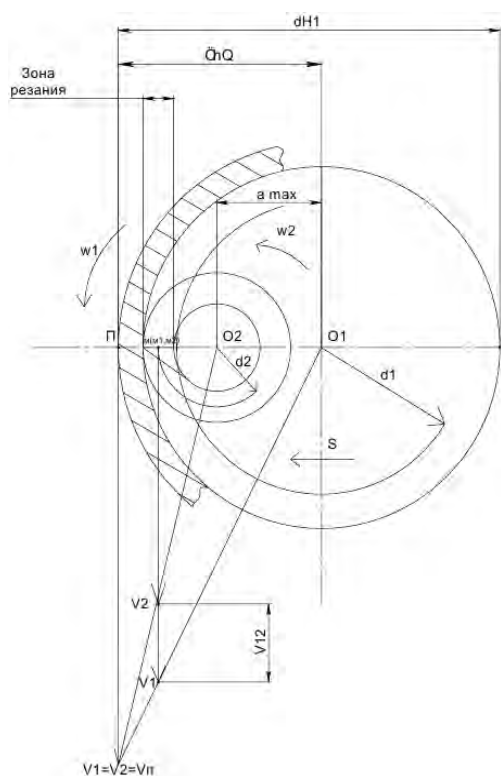


Рис2 Зона резания для внутреннего резьбофрезерования

В зоне резания взята точка $M(M_1, M_2)$. Диаметр резбовой поверхности в точке M_1 обозначен d_1 , диаметр червячной фрезы в точке M_2 – d_2 (точки M_1 и M_2 – совпадают).

Угловые скорости ω_1 резбовой поверхности и ω_2 червячной фрезы связаны угловым передаточным отношением:

$$i_{12} = \frac{1}{i_{21}}$$

Через V_1 и V_2 обозначены линейные скорости поверхностей резбы и фрезы соответственно в точке M .

Процесс резьбофрезерования внутренней резбы возможен будет только при условии, что в точке M (и других точках, расположенных в зоне резания) имеет место арифметическая разность линейных скоростей V_1 и V_2 .

При этом должно быть $V_1 > V_2$. Отсюда следует необходимое, но еще недостаточное условие внутреннего резьбофрезерования:

$$V_1 - V_2 = V_{12} > 0, \quad (7)$$

где V_{12} – скорость резания (проскальзывания) поверхностей.

Внутреннее резьбофрезерование производится только однозаходными червячными фрезами ($z_2 = 1$). Тогда, следовательно $i_{21} = z_1$.

С учетом значений V_1 , V_2 и i_{21} по выражению (7) определяется значение скорости резания при внутреннем резьбофрезеровании

$$V_{12} = \frac{\omega}{2(d_1 - z \cdot d)} > 0 \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что скорость резания V_{12} пропорционально угловой скорости ω_1 резбовой поверхности. Это означает, что при заданных параметрах поверхности резбы и фрезы, скорость резания V_{12} можно варьировать путем изменения только угловой скорости ω_1 резбовой поверхности.

Из условия (8) следует второе необходимое условие внутреннего фрезерования.

$$d_2 < \frac{d_1}{z_1}, \quad (9)$$

где: d_1 , d_2 – текущие значения диаметров резбовой поверхности и поверхности фрезы в точке M в зоне резания соответственно. Для использования в расчетах условию (9) придают вид:

$$d_{a2} < \frac{d_{f1}}{z_1} \quad (10)$$

где: d_{a2} – наибольший диаметр червячной фрезы.

d_{f1} – наименьший диаметр нарезаемой резбы.

Условие резания (8) можно конкретизировать, если заходность z_1 нарезаемой резбы заменить числами. Так при $z_1 = 1$ условие (10) примет вид:

$$d_{a2} < d_{f1} \quad (11)$$

При фрезеровании двухзаходной резбы ($z_1 = 2$) условие (11) имеет вид:

$$d_{a2} < \frac{d_{f1}}{2} \quad (12)$$

При фрезеровании трехзаходной резбы ($z_1 = 3$) условие (12)

$$d_{a2} < \frac{d_{f1}}{3} \quad (13)$$

Таким образом, условие (10), (11), (12), (13) являются необходимыми и достаточными для осуществления процесса внутреннего фрезерования резьб с числом заходов $z_1 = 1, 2, 3$.

Заключение

Рассмотренная методика пригодна для профилирования фрез, нарезающих резбу с любым углом и формой профиля. Для многозаходных резьб меняется передаточное число между изделием и фрезой, которое равно числу заходов нарезаемой резбы; число заходов фрезы принято равным единице.

Предложенная методика профилирования фрез для нарезания внутренних резьб апробирована в лаборатории зубчатых передач ДВФУ (ДВГТУ, ДВПИ).

Литература

- 1 Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. Изд-во "Наука", М., 1968
- 2 Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. Изд-во "Машиностроение", М., 1969.
- 3 Воронов В.Н. Изготовление резьб винтовым инструментом. //Станки и инструмент. 1991, № 10 - С. 14-16.
- 4 Глушко Е.В., Лоцманенко В.В. Об одном способе нарезания внутренней резьбы. / Исследование по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. Сб. статей. № 46, Изд-во ДВГТУ, Владивосток, 2006. 4стр.

- 5 Глушко Е.В., Морозова Н.Т. Технологическое обеспечение для метода нарезания метрической резьбы огибанием / Сб. статей Научно-практические аспекты развития современной техники и технологий в условиях курса инноваций, г. Магнитогорск, 2017 С. 51-53.
- 6 АС №1214350, Способ нарезания внутренней резьбы В.Н. Воронов, С.П. Баранов 15.09.1984, 28.02.1986
- 7 Мальков О.В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием. Электр. журн. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016 №4. С.1-33. Москва, Россия
- 8 Кексин А.И. Повышение эффективности технологического процесса изготовления внутренних резьб в изделиях горных машин /А.И. Кексин, В.В. Максаров / Металлообработка-2016-№2(92). –С. 27-33

References

1. Litvin F.L. The theory of meshing / Nauka, Moscow, 1968.
2. Lukshin V.S. The theory of helical surfaces in cutting tools design / Mashinostroenie, Moscow, 1969.
3. Voronov V.N. Threads production by a helical tool/ Stanki i instrument, 1991. №10, - p.14-16.
4. Glushko E.V., Lotsmanenko V.V. About one method of cutting an internal thread / The collection of articles with researches of shipbuilding and ship repair efficiency improvements, №46. / FESTU, Vladivostok, 2006. - p.6.
5. Glushko E.V., Morozova N.T. Technological support for cutting metric thread by enveloping/ Academic and research aspects of modern technologies development in the context of innovations. Collection of articles / Magnitogorsk, 2017. – p.51-53.
6. Voronov V.N., Baranov S.P., Inventors' certificate №1214350. Method of internal thread cutting/ 15.19.1984, 28.02.1986.
7. Malkov O.V. Anaysis of the Thread Milling Methods. Science and education of the Bauman MSTU, no.04, pp.1-33.
8. Keksин A/I. Improving the efficiency of the technological process of manufacturing of internal threads in the products of mining machines /Keksин A.I., Maksarov V.V./Metalloobrabotka, 2016 №2(92).- pp.27-33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Елена Владиленовна Глушко, доцент отделения Машиностроения, морской техники и транспорта Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: eglushko2006@mail.ru

Elena V. Glushko, associate professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: eglushko2006@mail.ru

Нина Тихоновна Морозова, кандидат технических наук, доцент Департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Дальневосточный федеральный университет Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: moronin56@mail.ru

Nina T. Morozova, Ph.D. (Eng), assistant professor Department of Computer-Integrated Manufacturing Systems, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: moronin56@mail.ru

Юрий Яковлевич Фершалов, доктор технических наук, профессор, профессор отделения Машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: fershalovjuriy@mail.ru

Yuriy Ya. Fershalov, Dr.Sci. (Eng), professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, e-mail: fershalovjuriy@mail.ru

Олеся Сергеевна Портнова, старший преподаватель отделения Машиностроения, морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10., e-mail: olesya.portnova@mail.ru

Olesya S. Portnova, Senior professor Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922, Russia, e-mail: fershalovjuriy@mail.ru

Поступила в редакцию: 04.03.2021
Принята к публикации: 05.05.2021

УДК 629.5.083.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.008>

Износ связей корпусных конструкций судов атомного технологического обслуживания ВМФ

А.А. Бокатова¹, e-mail: n_bokatova@mail.ru, Н.И Герасимов¹ e-mail: GerasivovNI@sstc.spb.ru
¹«ЦТСС», Санкт-Петербург, РФ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос износа связей корпусных конструкций судов атомно-технологического обслуживания военно-морского флота, транспортирующих жидкие радиоактивные отходы. Как известно, определение технического состояния корпуса судна является основным параметром установления их пригодности к дальнейшей эксплуатации.

Авторами были проанализированы исследования влияния гамма-облучения на лакокрасочные покрытия и установлено, что такое воздействие приводит к изменению основных характеристик лакокрасочных покрытий, вследствие чего наступает их отслаивание от поверхности корпусных конструкций.

В связи с тем, что ускоренное разрушение лакокрасочных покрытий влечет за собой более раннее коррозионное разрушение корпусных конструкций, авторами настоящей работы проводилось изучение скоростей изнашивания корпусных конструкций, подверженных воздействию ионизирующего облучению, так и не подверженных агрессивному воздействию груза для судов атомно-технологического обслуживания и сопоставление их с известными данными скоростей изнашивания для конструкций гражданских судов.

Результаты выполненного авторами исследования могут быть использованы в научно-обоснованном прогнозировании сроков службы и определении технического состояния корпусов судов атомно-технологического обслуживания.

Ключевые слова: вспомогательный флот, жидкие радиоактивные отходы, износ корпусных конструкций, корпус.

Wear of hulls and hull structures of Russian NAVY auxiliary vessels

Anastasiia A. Bokatova¹, e-mail: n_bokatova@mail.ru, Nikolai I. Gerasimov¹, e-mail: GerasivovNI@sstc.spb.ru,
¹«SSTC», St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article considers issues, related to wear of hulls and hull structures of Russian NAVY auxiliary vessels, used for transportation of liquid radioactive wastes.

As is known, assessment of ship hull state is the main criteria of ship readiness for further exploitation.

The authors analyzed surveys related to influence of gamma-irradiation on paint coatings and revealed alteration of their main characteristics followed by stripping from the ship hull.

Since accelerated destruction of paint coatings leads to early corrosion damage of hull structures, the authors analyzed wear rate of nuclear-servicing vessels hulls exposed and non-exposed to nuclear radiation and compared it with known wear rates of civil vessels hulls.

The obtained results may be used for scientifically-based forecasting of ship service life and assessment of technical state of nuclear-servicing vessels.

Keywords: auxiliary vessels, hull, liquid radioactive wastes, wear of hulls, paint coatings, wear rate, nuclear-servicing vessels, technical state assessment.

Введение

В конце 60х годов прошлого века в период бурного развития и становления атомного флота возникла необходимость создания нового класса судов атомно-технического обеспечения (далее АТО) кораблей ВМФ с ядерными энергетическими установками. Назначение судов АТО - транспортирование опасных жидких радиоактивных отходов (далее ЖРО). Специфическая область использования данных судов создает ряд проблем, связанных с особенностью поддержания их технического состояния на заданном уровне и повышенного внимания к систематическому контролю корпуса и корпусных конструкций.

Ненадлежащий учет факторов «старения» корпусов судов АТО может привести к экологическим катастрофам из-за попадания ЖРО в воды мирового океана и существенному отрицательному воздействию на окружающую среду. Подобные катастрофы могут стать непоправимыми.

Как отмечено авторами ранее в работе [1], большинство судов данного назначения к

настоящему времени достигли значительного возраста. Основная масса этих судов создавалась ещё в период начала возникновения потребности в данном классе транспортных средств и в то время, когда был разрешен сброс ЖРО в море [2]. Опыта эксплуатации данных судов не было.

Как известно на сегодняшний день, в цистернах с ЖРО судов АТО в результате перемешивания радиоактивных отходов образуются осадки с различными физико-химическими свойствами. Прием в одну и ту же цистерну то кислых, то щелочных ЖРО приводит к образованию на стенках цистерн осадков, сорбирующих радионуклиды и приводящих к повышенной коррозии цистерн с ЖРО. Кроме того, на судах АТО старой постройки были отмечены в цистернах хранения ЖРО случаи наличия нефтепродуктов. Попадание нефтепродуктов в ЖРО резко усложняет технологию их переработки и снижает эффективность дезактивации таких цистерн.

Определение износа связей корпусных конструкций судов атомного технологического обслуживания ВМФ

Как известно, определение технического состояния корпуса судна является основным параметром установления их пригодности к дальнейшей эксплуатации. В правилах Российского морского регистра судоходства (далее РС) [3], Российского речного регистра (далее РРР) [4] отражен опыт эксплуатации морских судов и судов смешанного плавания (река-море), позволяющий достаточно точно прогнозировать техническое состояние корпусов судов морского и речного флота в зависимости от срока эксплуатации. В правилах регистра (РРР и РС) даются значения скоростей изнашивания всех групп связей корпуса и корпусных конструкций судна.

Безусловно, данный опыт должен быть использован и для судов АТО, но при этом необходимо учитывать особенности эксплуатационной принадлежности этих судов, в которых износ связей некоторых корпусных конструкций существенно отличается от групп связей корпуса судна, не учитывающих данное специфическое предназначение. Так, например, было установлено, что наружная обшивка, набор, настилы, защитные покрытия, нанесенные на данные конструкции и находящиеся в зоне хранения ЖРО, имеют повышенные скорости изнашивания из-за воздействия радионуклидных солевых отложений. Скорость изнашивания связей остальных корпусных конструкций, не подвергающихся ионизирующему облучению радиоактивными отходами по опытным данным, не отличаются от расчетных значений, приведенных в правилах РРР и РС.

Защитные (лакокрасочные) покрытия, нанесенные на корпусные конструкции, являются очень важным элементом антикоррозионной защиты корпусов судов. Их преждевременное разрушение приводит к повышенному износу всех элементов корпуса судна и, следовательно, к необходимому увеличению количества измерений при освидетельствовании корпуса и объема ремонта. Исследования, проведенные в работе [5] показали, что такие показатели лакокрасочных покрытий (ЛКП), как эластичность, прочность на удар и твердость обладают большой чувствительностью к облучению. Подробные исследования по воздействию радиационного облучения на предмет разрушения ЛКП проведены авторами Шигориным В.Г. и Егоровым Б.Н. [6]. В связи с тем, что ускоренное разрушение ЛКП влечет за собой более раннее коррозионное разрушение корпусных конструкций, авторами настоящей работы проводилось изучение скоростей изнашивания корпусных конструкций, как соприкасающихся, так и не соприкасающихся с зонами хранения ЖРО для судов АТО и сопоставление их с известными данными скоростей изнашивания для конструкций гражданских судов.

На рисунке 1 приведены функциональные зависимости адгезии и микротвердости ЛКП от величины дозы ионизирующего облучения.

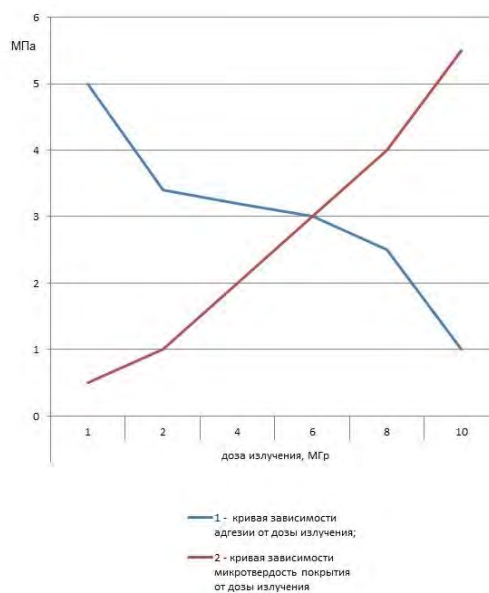
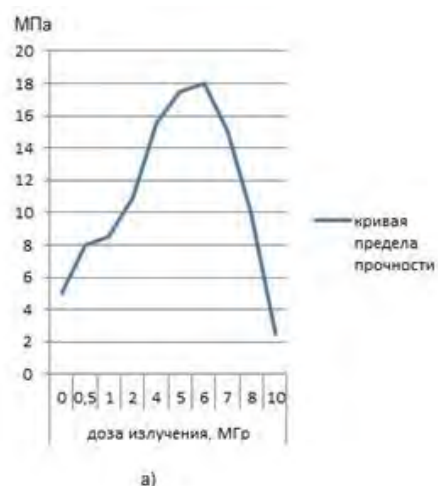


Рис. 1. Влияние дозы облучения на микротвердость и адгезию покрытия.

Из анализа графических кривых рисунка 1 следует отметить, что с увеличением дозы облучения приводит к резкому снижению прочности сцепления (адгезии) ЛКП с защищаемой поверхностью корпусных конструкций, практически до полной ее потери (кривая 1), а микротвердость покрытия (кривая 2) наоборот растет пропорционально дозе облучения, что делает покрытие менее эластичным, т.е. хрупким.

Наглядное изменение механических свойств ЛКП (прочности и относительного удлинения) от дозы облучения были получены при выполнении экспериментальных исследований в работе [6].

На рисунке 2 приведены опытные данные изменений таких механических свойств ЛКП, как прочность и относительное удлинение.



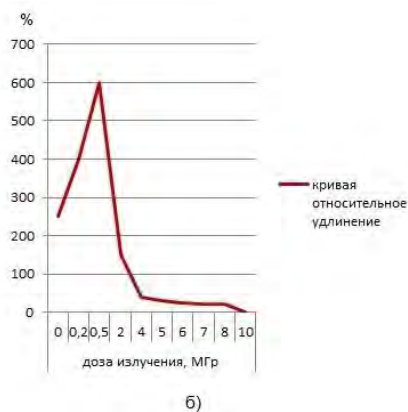


Рис. 2. Влияние дозы излучения на предел прочности (а) и относительное удлинение (б) покрытий при растяжении.

Из анализа графиков рисунков 1 и 2 установлено, что резкое снижение адгезии, предела прочности и относительного удлинения пленки ЛКП при растяжении приводит к потере пластических свойств и, как следствие, к росту внутренних напряжений на границе металл – покрытие, вследствие чего

наступает отслаивание покрытия от поверхности корпусных конструкций.

В результате отслаивания защитных покрытий, нарушении их целостности возникает прямое взаимодействие агрессивного состава ЖРО со стенками цистерны, корпусной конструкцией судна.

В связи с отмеченным, представляется необходимым изучить:

- скорости изнашивания связей как соприкасающихся, так и не соприкасающихся с зонами хранения ЖРО судов ВМФ и сопоставить их с гражданскими судами;
- продолжительность стойкости ЛКП при воздействии на нее ионизирующего облучения.

Для исследования скоростей изнашивания связей корпусных конструкций судов АТО, авторами были проанализированы результаты дефектации большой группы судов АТО ВМФ, после 45 и 51 года эксплуатации. Данные по коррозионным износам корпусов судов собраны на АО «СВРЦ», ФГУП СРЗ «Нерпа» и других судоремонтных предприятиях. Результаты дефектации каждого судна представлялись в виде таблице 1.

Таблица 1

Результаты дефектации судна (пример заполнения таблицы)

п/п	шп	№ листа	S ₀	S ₁ после 45 лет	S ₁ после 51 года	T*	ΔS=S-S _{ост}	ΔS _i /T _i = c _i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПрБ	группа связей: листы наружной обшивки							
1.1	33-43	36	12,0	10,9	-	45	1,1	0,024
1.2					10,7	51	1,3	0,026
1.3					-	6	0,2	0,033
2.1	33-43	37	12,0	12,0	-	39	1,2	0,031
2.2					10,7	51	1,3	0,026
2.3					-	6	1,3	0,217
								$\sum_{i=1}^n c_i$

Примечание:

1. В графе 7 указывается срок службы листа к моменту определения его остаточной толщины S₁;

2. Если остаточная толщина листа S₁ близка к построечной S₀, то принимается, что лист за время до предыдущей дефектации получил износ равный 0,1S₀, а срок службы до выполнения измерений равен (T - 6) лет, где T* – год службы судна во время измерений остаточной толщины.

Для гражданских судов много лет собирались и анализировались данные скоростей изнашивания [7]. В результате обработки данных было получено, что закон изменения скоростей изнашивания элементов корпуса судов может подчиняться аппроксимирующим кривым различного вида -

нормальному закону, гамма-распределению, кривыми Пирсона. Поскольку скорость изнашивания связей зависит от значительного числа факторов, среди которых такие, как перекал листов, температура, соленость среды, скорость потока, наличие пластических и переменных упругих деформаций, воздействие ЖРО на защитные покрытия и др., справедливо для всех случаев использовать нормальный закон распределения, что сделано в правилах РРР и РС с учетом незначительности коэффициентов асимметрии и эксцесса измерений.

Практика также показала, как отмечено авторами Барышниковым С.О., Погодаевым Л.И. и Чистовым В.Б в [8], что можно воспользоваться нормальным законом распределения скоростей изнашивания листовых элементов для обоснования и выбора

метода ремонта и прогнозирования его объема, а также оценки надежности корпуса с достаточной степенью точности.

Использование нормального закона распределения позволяет определить средние скорости изнашивания по формуле:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n}, \quad (1)$$

где n – количество обследованных элементов в заданной группе связей по нескольким судам;

c_i – скорость изнашивания элемента в группе связей.

Среднеквадратическое отклонение скоростей изнашивания характеризует разброс фактических скоростей изнашивания относительно математического ожидания \bar{c} .

$$\sigma_c = \pm \sqrt{\frac{\sum (c_i - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Для практического применения в работе в качестве параметра характеризующего разброс значений случайной величины относительно ее математического ожидания, удобнее использовать безразмерный коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma_c}{\bar{c}} \quad (3)$$

$$v = 0,51 - 1,06 \bar{c} \quad (4)$$

Для определения v использованы статистические данные по скоростям изнашивания связей корпусов судов АТО приведенных в таблице 2, где дано сравнение средних и стандартов скоростей изнашивания с полученными после обработки данных таблицы 1.

Таблица 2

Группы связей:	\bar{c} (по Правилам РС)	\bar{c}	σ_c	$v_{(4)}$	$v_{(3)}$
1	2	3	4	5	6
листы обшивки борта (ПрБ)	0,20	0,20	0,13	0,30	0,65
листы обшивки борта (ЛБ)	0,20	0,20	0,13	0,30	0,65
листы обшивки борта (ПрБ) в районе цистерн ЖРО (агрессивного груза)	0,20	0,25	0,10	0,25	0,40
листы обшивки борта (ЛБ) в районе цистерн ЖРО (агрессивного груза)	0,20	0,24	0,11	0,26	0,46

Примечание:

1. В графе 2 приведены данные средней скорости изнашивания \bar{c} на основании Правил РС;
2. В графе 3 и 4 \bar{c} и σ_c рассчитаны на основании данных, приведенных в таблице 1;
3. В графе 5 коэффициент вариации $v_{(4)}$ рассчитан с учетом данных таблицы 1 (по формуле (4));
4. В графе 6 коэффициент вариации $v_{(3)}$ рассчитан на основании данных таблицы 1 (по формуле (3)).

В исследованиях [9] установлено, что статистические характеристики скоростей изнашивания листов элементов (математическое ожидание и коэффициент вариации) со временем не изменяются.

Из таблицы 2 можно установить, что скорости изнашивания связей, не соприкасающихся с излучением, совпадают с расчетными скоростями изнашивания, изложенными в правилах, а скорости изнашивания конструкций, находящихся в районе

цистерн ЖРО, превышают значения скоростей изнашивания, определенные согласно Правил регистра (PPP и РС).

Заключение

Выполненные авторами исследования и проведенный расчетный анализ позволили установить значения скоростей изнашивания в районе танков с агрессивными грузами и неизменность характеристик скоростей изнашивания элементов, расположенных в местах, не подверженных агрессивному воздействию груза.

Результаты выполненного авторами исследования могут быть использованы в определении научно-обоснованных затрат на прогнозирование технического состояния корпусов судов АТО, на заданном уровне, что позволит сократить: время, объем работ и материалов, необходимых для выполнения ремонта.

Литература

1. Бокатова А.А., Веселков В.В. Об оценке технического состояния корпусов судов атомно-технологического обеспечения ВМФ. «Судостроение» 2020 №1;
2. Анитропов В.А. В тени ядерного флота. «Жизнь и безопасность», 2001 №1-2;
3. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. РМРС. НД 2-020101-012, 2020;
4. Правила Российского речного регистра, 2017;

5. Князев В.К. Действие ядерного излучения на физико-механические свойства лакокрасочных покрытий. ЛКМ и их применение, 1970 №1;
6. Шигорин В.Г., Егоров Б.Н. Исследование влияния гамма-излучения на некоторые водостойкие лакокрасочные покрытия. ЛКМ и их применение, 1971 №3;
7. Гуревич И.М. Статистический анализ по износам корпусов судов типа «Большая Волга» и «Шестая пятилетка»// труды ЛИВТ – 1969 вып. 86 с.5-17;
8. Барышников С.О., Погодаев Л.И., Чистов В.Б. «Надежность механизмов и корпусов судов», СПб, 2018;
9. Ефименков Ю.И. Анализ нормативов скоростей изнашивания связей и остаточных деформаций. Корректировка Правил РРР в части оценки общей прочности проектируемых судов в конце расчетного срока службы. Отчет. 2005.

References

1. Bokatova A.A., Veselkov V. V. Ob otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya korpusov sudov atomno-tekhnologicheskogo obespecheniya VMF. [Checking technical condition of hulls of NAVY support vessels]. «Sudostroenie» №1, 2020;
2. Anitropov V.A. V teni yadernogo flota. Izd. [In the shade of nuclear-servicing fleet]. «Zhizn' i bezopasnost'» №1-2, 2001;
3. Pravila klassifikatsionnykh osvidetel'stvovaniy sudov v ekspluatatsii. RMRS. [Rules for the classification surveys of ships in service (revision 2020)]. ND 2-020101-012, 2020;
4. Pravila Rossiyskogo rechnogo registra, 2017. [Rules of the Russian River Register (revision 2017)];
5. Knyazev V.K. Deystvie yadernogo izlucheniya na fiziko-mekhanicheskie svoystva lakokrasochnykh pokrytyi. [Impact of nuclear radiation of physical and mechanical properties of paint coatings]. LKM i ikh primeneniye, 1970 №1;
6. Shigorin V.G., Egorov B.N. Issledovanie vliyaniya gamma-izlucheniya na nekotorye vodostoykie lakokrasochnye pokrytiya. [Surveys of gamma-irradiation impact on some water-resistant paint coatings]. LKM i ikh primeneniye, 1971, № 3;
7. Gurevich I.M. Statisticheskiy analiz po iznosam korpusov sudov tipa «Bol'shaya Volga» i «Shestaya pyatiletka». [Statistical analysis of hull wear of "Bolshaya Volga" and "Shestaya Pyatiletka" vessels], Trudi LIVT – 1969 №86;
8. Baryshnikov S.O., Pogodaev L.I., Chistov V.B. «Nadezhnost' mekhanizmov i korpusov sudov». [Reliability of ship mechanisms and hulls], SPb, 2018;
9. Efimenkov Yu.I. Analiz normativov skorostey iznashivaniya svyazey i ostatochnykh deformatsiy. Korrektirovka Pravil RRR v chasti otsenki obshchey prochnosti proektiruemykh sudov v kontse raschetnogo sroka sluzhby. Otchet. [Analysis of structures wear rate and residual deformations. Correction of PPP rules in frames of overall ship strength in the end of service life. Report], 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анастасия Антоновна Бокатова, начальник сектора, «Центр технологии судостроения и судоремонта» («ЦТСС»), 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7 e-mail: n_bokatova@mail.ru

Николай Иванович Герасимов, доктор технических наук, главный ученый секретарь, «Центр технологии судостроения и судоремонта» («ЦТСС») 198095, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7 e-mail: GerasivovNI@sstc.spb.ru

Anastasiia A. Bokatova, Chief of sector, "Shipbuilding & Shiprepair Tehnology Center" ("SSTC") st. Promishlennaya, 7, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: n_bokatova@mail.ru

Nikolai I. Gerasimov, Dr. Sci. (Eng.), Chief academic secretary, "Shipbuilding & Shiprepair Tehnology Center" ("SSTC"), st. Promishlennaya, 7, St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: GerasivovNI@sstc.spb.ru

Поступила в редакцию: 12.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

УДК 629.5.016.8:539.42:620.193.21

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.009>

Влияние климатических факторов на работоспособность полимерных покрытий для судовых конструкций

С.И. Корягин¹ skoryagin@kantiana.ru, О.В. Шарков¹ e-mail: osharkov@kantiana.ruН.Л. Великанов¹ e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. Эксплуатация корпусных конструкций современных морских судов проходит в различных частях Мирового океана. Температура окружающей среды может изменяться в широких пределах от резко отрицательных до высоких температур тропических районов. Наличие полимерных покрытий на металлических конструкциях способствует улучшению их работы. Работоспособность полимерных покрытий требует проверки при изменении температуры, влажности воздуха. Проверка может быть проведена в условиях лабораторного или натурального экспериментов. В статье описаны экспериментальные исследования адгезионной прочности полимерных покрытий в лабораторных условиях. Установлены зависимости напряжений от изменений различных показателей окружающей среды. Показано, что для исследуемых полимерных покрытий изменение этих показателей мало влияет на адгезионную прочность покрытий. Проведенные исследования будут способствовать разработке технологий нанесения полимерных покрытий, устойчивых к изменениям климатических факторов.

Ключевые слова: полимерные покрытия, климатические факторы, адгезионная прочность, циклическое воздействие температур, судовые конструкции

Influence of climatic factors on the performance of polymer coatings for ship structures

Sergey I. Koryagin¹ skoryagin@kantiana.ru, Oleg V. Sharkov¹ e-mail: osharkov@kantiana.ruNikolay L. Velikanov¹ e-mail: nvelikanov@kantiana.ru,¹Immanuel Kant Baltic Federal University

Abstract. The operation of the hull structures of modern marine vessels takes place in various parts of the World Ocean. The ambient temperature can vary widely from sharply negative to high temperatures in tropical areas. The presence of polymer coatings on metal structures helps to improve their performance. The performance of polymer coatings requires checking when changing the temperature and humidity of the air. The test can be carried out in the conditions of laboratory or field experiments. The article describes experimental studies of the adhesive strength of polymer coatings under laboratory conditions. The dependences of stresses on changes in various environmental parameters are established. It is shown that for the studied polymer coatings, the change in these parameters has little effect on the adhesive strength of the coatings. The conducted research will contribute to the development of technologies for applying polymer coatings that are resistant to changes in climatic factors.

Key words: polymer coatings, climatic factors, adhesive strength, cyclic exposure to temperatures, ship structures.

Введение

В процессе эксплуатации судовые конструкции подвергаются воздействию различных климатических факторов и абразивному изнашиванию [1–9].

Климатические факторы оказывают влияние на изменение работоспособности конструктивных элементов судов эксплуатирующихся в районах как с низкими (арктический и антарктический регионы), так и с высокими (тропический и субтропический регионы) температурами [3, 5–13].

Интенсивный характер возрастания объемов восстановления элементов рыбопромысловых судов обусловлен повышенным механическим, эрозионным и коррозионным изнашиванием в районах выполнения производственных операций (истирание слипа и промысловой палубы при постановке и выборке трала) и зонах обработки рыбы и морепродуктов по причине коррозии и действия агрессивных сред (морской воды, отходов рыбопродуктов, дезинфицирующих средств и т.п.).

В процессе эксплуатации корпус судна при швартовках в открытом море подвергается частым ударам, что приводит к появлению трещин в самых различных его частях. Образующиеся при соударении бухтины и вмятины становятся зонами

повышенной коррозии, что приводит к разрушению элементов конструкций и появлению коррозии под напряжением.

На восстановление герметичности и несущей способности судовых металлических конструкций затрачивается до четверти судоремонтных мощностей заводов. Особенно значительные временные и материальные затраты приходятся на выполнение ремонта корпусов судов за счет замены изношенной конструкции на новую [10].

Полимерные антиабразивные покрытия позволяют уменьшить величину износа конструктивных элементов рыбопромысловых судов, что позволяет получить существенный экономический эффект за счет увеличения срока службы элементов, а так же снижения затрат при обслуживании и ремонте [14–18].

В данной статье приведены результаты исследования поведения полимерных покрытий судовых конструкций в условиях, моделирующих различные типы климатических воздействий, и предложено антиабразивное покрытие на основе клеевых композиций «ВАК-А» и «Спрут-Плюс».

1. Современное состояние вопроса

Из литературы известно антиабразивное покрытие, применяемое для повышения

износостойкости металлических конструктивных элементов, на основе бакелитового лака, в который в количестве примерно 70...80 % как абразивный порошок включается зола.

Такое покрытие наносят на очищенные и обезжиренные поверхности, что затрудняет его использование на судовых конструкциях. Кроме этого его нельзя наносить на судовые элементы, которые подвергаются при эксплуатации существенным деформациям, таким как борт рыболовного судна в районе установки кранцевой защиты и др.

В качестве примера также можно привести антиабразивное покрытие для металлических листовых элементов на основе полимерного связующего, в состав которого входят сополимера стирола с натрилакриловой кислотой и буталакриловым каучуком, растворенным в органическом растворителе, минеральные наполнители и красители.

Недостатком этого покрытия является сложность его нанесения на ремонтируемые элементы, связанная с большой трудоемкостью процесса подготовки поверхности. При этом при испарении связующего органического растворителя в покрытие образуются поры, что уменьшает его защитные характеристики, а натрилакриловая кислота является токсичным элементом. Покрытие также имеет относительно низкую адгезию к металлу.

С целью повышения адгезионной прочности и обеспечения возможности нанесения покрытия на влажные и загрязненные нефтепродуктами поверхности, а также на поверхности элементов конструкций, получающих в процессе эксплуатации большие деформации, что характерно для судовых конструктивных элементов, разработано улучшенное антиабразивное покрытие.

Поставленная цель достигается тем, что покрытие является двухслойным, а в качестве связующего могут быть использованы клеевые композиции «Спрут-Плюс» или «ВАК-А». Для повышения механической прочности один слой содержит 10...20 % стекловолокна длиной 10...15 мм, а другой слой содержит абразивные элементы – электрокорунд, песок, графит (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики покрытий свойства покрытий

Состав	Варианты покрытия		
	1	2	3
Клеевая композиция	30 %	35 %	40 %
Электрокорунд	10 %	12 %	15 %
Кварцевый песок	53 %	43 %	32 %
Графит	7 %	10 %	13 %

Технология использования предлагаемого покрытия следующая.

Сначала наносят первый слой покрытия, а после его отверждения (в течение 24 часов) – второй слой. Толщина каждого слоя покрытия – в пределах 1 мм. Затем образцы выдерживают на воздухе в течение десяти суток. Нанесение покрытия на металлическую поверхность судового конструктивного элемента можно осуществлять на воздухе при нормальной температуре.

Использование клеевых композиций «ВАК-А» и «Спрут-Плюс» позволяет осуществлять нанесение покрытия на влажные и загрязненные

нефтепродуктами поверхности. При этом удается достичь высокой степени однородности каждого слоя покрытия и реализовать высокие адгезивные свойства клея.

2. Исследования механических свойств покрытий

Для оценки прочностных характеристик разработанных полимерных покрытий, с учетом требований ГОСТ 14759-69. «Клеи. Методы определения прочности при сдвиге» и ГОСТ 14760-69. «Клеи. Методы определения прочности при отрыве» применялись две методики определения их адгезионной прочности – на растяжение (отрыв) и сдвиг [19–21].

Опытные образцы были выполнены из материала сталь Ст.3 или алюминиевого сплава АМг с нанесенным, согласно разработанной технологии, полимерным покрытием.

Определение адгезионной прочности опытных образцов проводилось на разрывной машине Р-5 при скорости нагружения 5 Н/с. Испытания проходили при нормальных условиях окружающей среды – температура воздуха (293±2) К, относительная влажность 60...70 %.

Результаты исследования механических свойств предлагаемых антиабразивных покрытий в сравнении с известным приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства покрытий

Показатель	Варианты покрытия			
	1	2	3	4
Удельный износ, мм/кВт·час	234	213	251	308
Прочность при ударе, Дж	7,3	8,2	7,1	5,0
Адгезия на отрыв, МПа:				
к стали Ст.3	24,6	26,0	24,2	2,00
к сплаву АМг	20,8	23,0	20,4	1,84
Адгезия на сдвиг, МПа:				
к стали Ст.3	20,9	22,0	20,4	1,80
к сплаву АМг	17,0	18,0	16,5	1,62
Примечание: 1, 2 и 3 – предлагаемые покрытия; 4 – известное покрытие;				

Как видно из табл. 2 предлагаемые антиабразивные покрытия в сравнении с известным показали более высокие прочностные и защитные свойства.

Применение клея «ВАК-А» или «Спрут-Плюс» позволяет получать хорошую адгезию покрытия к влажным и загрязненным нефтепродуктами поверхностям, что дает возможность применить предлагаемое покрытие в судоремонте и других отраслях народного хозяйства.

Армирование первого слоя покрытия стекловолокном повышает его трещиностойкость, в то же время относительно низкое содержание стекловолокна (по сравнению со стеклопластиком) обеспечивает при задирах покрытия отрыв отслоившейся части без разрушения всего покрытия на элементах, испытывающих при эксплуатации

большие контактные нагрузки, например, на настиле и стенках слипа, а также на бортовой обшивке рыбопромыслового судна в районе установки кранцевой защиты, что значительно расширит область применения антиабразивного покрытия.

3. Исследования влияния климатических факторов

С целью моделирования климатических факторов опытные образцы исследовали на влагоустойчивость, холодоустойчивость, теплоустойчивость и циклическое воздействие температур, а затем испытывали на сдвиг и нормальный отрыв.

В качестве основы использовалась сталь Ст. 3, на которую на воздухе при комнатной температуре наносили армированное полимерное покрытие на основе клеевых композиций «ВАК» и «Спрут-Плюс» и наполнителя из стеклоткани марки Е-11-ГВС-9.

Для испытания на влагоустойчивость элементы помещали в камеру с температурой 323 К где они подвергались воздействию влаги и тепла по следующему режиму: влажность 100%, температура камеры 323 К, продолжительность испытаний 15 часов; затем снижали температуру до 298 К, влажность до 90%, продолжительность выдержки до 10 часов.

Общее время пребывания образцов в камере составило 75 часов. В результате визуального осмотра (с помощью лупы 20-кратного увеличения) установлено отсутствие каких-либо изменений материала.

Для определения циклического воздействия температур элементы помещали в камеру с температурой 223 К и выдерживали в ней в течение 3 часов. Затем образцы вынимали из камеры и доводили до температуры окружающей среды 293 К. После этого их снова помещали в камеру с температурой 323 К и выдерживали в ней в течение 3 часов.

Всего было десять таких циклов. Визуальным осмотром установлено отсутствие каких-либо изменений материала.

Для испытания на теплоустойчивость элементы помещали в камеру с температурой 313 К и выдерживали в ней в течение 3 часов, затем температуру повышали до 333 К и образцы выдерживали еще 3 часа, затем температуру повышали снова до 353 К и выдерживали их еще 3 часа. Визуальным осмотром каких-либо изменений материала не обнаружено.

Для определения холодоустойчивости элементы помещали в камеру с температурой 233 К, выдерживали в ней в течение 3 часов, затем температуру понижали до 213 К и образцы выдерживали еще 3 часа, затем температуру снова понижали до 199 К и выдерживали их еще 3 часа. Визуальным осмотром никаких изменений материала не обнаружено.

На рис. 1 и 2 приведены результаты испытаний изменения свойств полимерных покрытий после воздействия на них различных климатических факторов в сравнении с контрольным образцом: 1 – контрольный образец; 2 – холодоустойчивость; 3 – циклическое воздействие температуры; 4 – теплоустойчивость; 5 – влагоустойчивость.

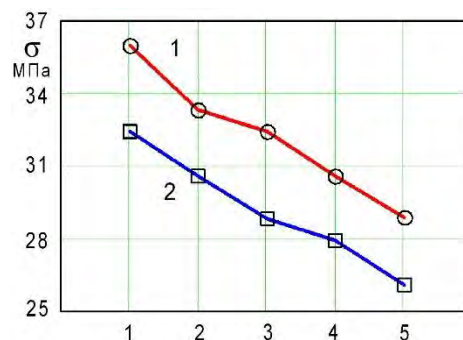


Рис. 1. Влияние климатических факторов на прочность полимерного покрытия при отрыве: 1 – Струт-Плюс; 2 – ВАК-А.

Определение адгезионной прочности опытных образцов на отрыв и сдвиг, после воздействия климатических факторов, проводилось по методам, рассмотренным ранее.

Как видно из полученных результатов механические свойства полимерных покрытий после испытания их на воздействия климатических факторов изменились незначительно и практически сопоставимы с контрольными.

Наименьшее снижение адгезионной прочности полимерного покрытия наблюдалось при испытаниях на холодоустойчивость и не превышало 5,5...7,5 % на отрыв и 3,1...4,7 % на сдвиг.

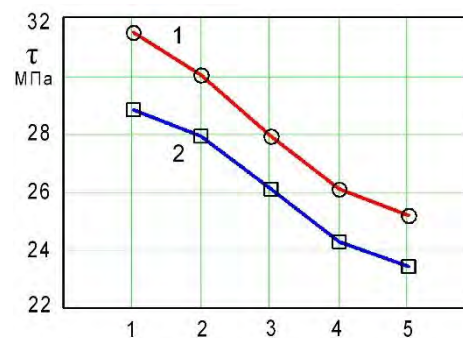


Рис. 2. Влияние климатических факторов на прочность полимерного покрытия при сдвиге: 1 – Струт-Плюс; 2 – ВАК-А.

Наибольшее снижение адгезионная прочность полимерного покрытия наблюдалось при испытаниях на влагоустойчивость и не превышало 19,3...19,7 % на отрыв и 18,7...19,8 % на сдвиг.

Адгезионная прочность полимерного покрытия на основе клеевой композиции «Спрут-Плюс» превышает аналогичный показатель на основе композиции «ВАК-А» на 7,6...11,1 % при всех видах климатических воздействий.

Это дает нам основание рекомендовать армированные полимерные покрытия для эксплуатации в составе судовых конструкций, подвергающихся воздействию различных климатических факторов.

Заключение

Предложен вариант технологии нанесения полимерных покрытий на судовые металлические конструкции.

Разработана методика экспериментальных исследований адгезионной прочности полимерного

покрытия в условиях изменения параметров окружающей среды.

Проведены испытания образцов с полимерными покрытиями на адгезионную прочность. Показано,

что работоспособность образцов практически не меняется.

Проведенные исследования позволяют расширить область применения полимерных покрытий для корпусных конструкций морских судов.

Литература

1. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier // Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
2. Zayed A., Garbatov Y., Guedes S.C. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions // Ocean engineering. 2018. V.163. Pp. 299-306.
3. Orimolade A.P., Gudmestad O.T., Wold L.E. Vessel stability in polar low situations // Ships and offshore structures. 2017. V.12(1). Pp. 82-87.
4. Jakubowski M. Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship structures. Part I. Pittingcorrosion of ship structures // Polish maritime research. 2014. V.21(1). Pp. 62-69.
5. Müller F., Schøyen H. Polar research and supply vessel capabilities – An exploratory study // Ocean Engineering. 2021. V.224. 108671.
6. Крюков Н.Д. Рекомендации для судов при плавании в условиях тропических штормов северной Атлантики // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. №4(32). С. 31-38.
7. Семенихин Я.Н., Новосельцев Е.М. Развитие судоходства в Арктике – возможности и риски // Вестник транспорта. 2017. №11. С. 2-5.
8. Миронов А.С., Новиков В.В. О коррозионном износе и повреждаемости судовых конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2014. Т.1. №3(25). С.63-70.
9. Михеев А.И. Влияние обрастания и низких температур на безопасную эксплуатацию судов // Водный транспорт. 2013. №3(18). С. 056-061.
10. Корягин С.И., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Напряженное состояние полимерных покрытий, примененных при ремонте судовых корпусных конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №3-3(45). С. 37-42.
11. Prestrelo L., Oliveira R.,Vianna M. A new proposal to classify small fishing vessels to improve tropical estuarine fishery management // Fisheries research. 2019. V.211. Pp. 100-110.
12. Нго Д.Т. О рыболовных судах наливного типа для удаленных районов прибрежного рыболовства Вьетнама // Морские интеллектуальные технологии. 2013. №3(21). С. 15-18.
13. Кухоренко К.Г. Перспективы российского океанического рыболовства в Атлантике и ЮВТО // Рыбное хозяйство. 2012. № 2. С. 32-33.
14. Yang J.W., Park H., Chun H.H., Ceccio S.L. Perlin M., Lee I. Development and performance at high Reynolds number of a skin-friction reducing marine paint using polymer additives // Ocean Engineering. 2014. V.84. Pp. 183-193.
15. Chen Y., Chen F., Du Z.P., Wang Y., Zhao P.D. Hua H.X. Protective effect of polymer coating on the circular steel plate response to near-field underwater explosions // Marine Structures. 2015. V.40. Pp. 247-266.
16. Blake J.I.R., Shenoi R.A., Das P.K., Yang N. The application of reliability methods in the design of stiffened FRP composite panels for marine vessels // Ships and offshore structures. 2009. V.4(3). Pp. 287-297.
17. Емельянов М.Д., Соминская Э.В. Применение композиционных материалов при ремонте корпусов морских судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №48-49. С. 77-84.
18. Корягин С.И., Шарков О.В., Великанов Н.Л. Оценка трещиностойкости полимерных покрытий, используемых при ремонте судовых конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2019. №2-2(44). С. 39-44.
19. Pisanu L., Santiago L.C., Barbosa J.D.V., Beal V.E., Nascimento M.L.F. Strength shear test for adhesive joints between dissimilar materials obtained by multicomponent injection // International journal of adhesion and adhesives. 2018. V.86. Pp. 22-28.
20. Derewonko A., Godzimirski J., Kosiuczenko K., Niezgoda T., Kiczko A. Strength assessment of adhesive-bonded joints // Computational materials science. 2008. V.43(1). Pp. 157-164.
21. Финогенов Г.Н., Петрова А.П. Ресурсная прочность клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №11. С. 29-31.

References

1. Van T.V., Yang P. Effect of corrosion on the ship hull of a double hull very large crude oil carrier. Journal of marine science and application. 2017. V.16(3). Pp. 334-343.
2. Zayed A., Garbatov Y., Guedes S.C. Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions. Ocean engineering. 2018. V.163. Pp. 299-306.
3. Orimolade A.P., Gudmestad O.T., Wold L.E. Vessel stability in polar low situations. Ships and offshore structures. 2017. V.12(1). Pp. 82-87.
4. Jakubowski M. Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship structures. Part I. Pittingcorrosion of ship structures. Polish maritime research. 2014. V.21(1). Pp. 62-69.
5. Müller F., Schøyen H. Polar research and supply vessel capabilities – An exploratory study. Ocean Engineering. 2021. V.224. 108671.

6. Kryukov N.D. Rekomendatsii dlya sudov pri plavanii v usloviyakh tropicheskikh shtormov severnoy Atlantiki [Recommendations for vessels navigating in North Atlantic tropical storm conditions] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2015. No4(32). Pp. 31-38.
7. Semenikhin Ya.N., Novoseltsev E.M. Razvitiye sudokhodstva v Arktike – vozmozhnosti i riski [Development of shipping in the Arctic – opportunities and risks] Vestnik transporta. 2017. No11. Pp. 2-5.
8. Mironov A.S., Novikov V.V. O korrozionnom iznose i povrezhdaemosti sudovykh konstruksiy [On corrosion wear and damage to ship structures] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2014. V.1. No3(25). Pp. 63-70.
9. Mikheev A.I. Vliyaniye obrastaniya i nizkikh temperatur na bezopasnyuyu ekspluatatsiyu sudov [The impact of fouling and low temperatures on the safe operation of ships] Vodnyy transport. 2013. No3(18). Pp. 056-061.
10. Koryagin S.I., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Napryazhennoe sostoyaniye polimernykh pokrytiy, primenennykh pri remonte sudovykh korpusnykh konstruksiy [The stress state of reinforced polymeric coatings used by repair of ship hull structures] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. №3-3(45). Pp. 37-42.
11. Prestrelo L., Oliveira R., Vianna M. A new proposal to classify small fishing vessels to improve tropical estuarine fishery management. Fisheries research. 2019. V.211. Pp. 100-110.
12. Ngo D.T. O rybolovnykh sudakh nalivnogo tipa dlya udalennykh rayonov pribrezhnogo rybolovstva V'etnama [About liquid-type fishing vessels for remote areas of coastal fishing in Vietnam] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2013. No3(21). Pp. 15-18.
13. Kukhorenko K.G. Perspektivy rossiyskogo okeanicheskogo rybolovstva v Atlantike i YuVTO [Prospects for russian oceanic fisheries in the Atlantic and South-East Pacific ocean] Rybnoe khozyaystvo. 2012. No2. Pp. 32-33.
14. Yang J.W., Park H., Chun H.H., Ceccio S.L., Perlin M., Lee I. Development and performance at high Reynolds number of a skin-friction reducing marine paint using polymer additives. Ocean Engineering. 2014. V.84. Pp. 183-193.
15. Chen Y., Chen F., Du Z.P., Wang Y., Zhao P.D. Hua H.X. Protective effect of polymer coating on the circular steel plate response to near-field underwater explosions. Marine Structures. 2015. V.40. Pp. 247-266.
16. Blake J.I.R., Sheno R.A., Das P.K., Yang N. The application of reliability methods in the design of stiffened FRP composite panels for marine vessels. Ships and offshore structures. 2009. V.4(3). Pp. 287-297.
17. Emelyanov M.D., Sominskaya E.V. Primeneniye kompozitsionnykh materialov pri remonte korpusov morskikh sudov [Application of composite materials in the repair of marine hulls] Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 2017. No48-49. Pp. 77-84.
18. Koryagin S.I., Sharkov O.V., Velikanov N.L. Otsenka treščinostoykosti polimernykh pokrytiy, ispol'zuemykh pri remonte sudovykh konstruksiy [Evaluation of polymer coatings crack resistance used in the repair of shipboard structures] Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. №2-2(44). Pp. 39-44.
19. Pisanu L., Santiago L.C., Barbosa J.D.V., Beal V.E., Nascimento M.L.F. Strength shear test for adhesive joints between dissimilar materials obtained by multicomponent injection. International journal of adhesion and adhesives. 2018. V.86. Pp. 22-28.
20. Derewonko A., Godzimirski J., Kosiuczenko K., Niezgoda T., Kiczko A. Strength assessment of adhesive-bonded joints. Computational materials science. 2008. V.43(1). Pp. 157-164.
21. Finogenov G.N., Petrova A.P. Resursnaya prochnost' kleevykh soedineniy [Resource strength of adhesive joints] Klei. Germetiki. Tekhnologi. 2005. No11. Pp. 29-31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Иванович Корягин, доктор технических наук, профессор, директор инженерно-технического института, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Sergey I. Koryagin, Dr.Sci. (Eng), Professor, Director of the Engineering and technology institute, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: skoryagin@kantiana.ru

Oleg V. Sharkov, Dr.Sci. (Eng), Associate professor, Professor of the Department of engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru

Nikolay L. Velikanov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of mechanical engineering and technical systems, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation, 236016, Kaliningrad, A. Nevskogo, 14, e-mail: nvelikanov@kantiana.ru

Поступила в редакцию: 12.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 629.123:621.43.052

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.010>

Исследования радиально-осевой турбины импульсной системы наддува судового дизеля

А.В. Пассар¹ e-mail: passar_av@mail.ru, Д.В. Тимошенко² e-mail: 000595@pnu.edu.ru,
А.Н. Бердник² e-mail: alex.bdk75@yandex.ru

¹Вычислительный центр ДВО РАН, ²Тихоокеанский государственный университет

Аннотация. В статье представлены результаты исследований радиально-осевой турбины, работающей в составе импульсной системы наддува среднеоборотного судового дизеля. Исследования носили теоретический и экспериментальный характер и базировались на предлагаемом методе проектирования и расчета, который комбинируя на определенных этапах модели расчета радиально-осевой турбины, а также замкнутую модель рабочего процесса комбинированного двигателя, позволяет решать задачи проектирования проточных частей турбины для работы в нестационарном потоке импульсной системы наддува. Целью исследований является отработка основных положений предлагаемого метода проектирования радиально-осевой турбины, работающей в составе импульсной системы наддува комбинированного двигателя, на примере поиска оптимальных параметров радиально-осевой турбины турбокомпрессора среднеоборотного судового дизеля размерности 18/22. В работе получена модернизированная геометрия проточной части турбины. Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований характеристик модернизированной и штатной турбин, подтверждающие повышение эффективности модернизированной турбины во всем диапазоне ее характеристики. Представлены результаты испытаний судового дизеля 6ЧН 18/22 с модернизированной и штатной турбинами по нагрузочной характеристике, показывающие положительное влияние измененной геометрии турбины на эффективные показатели дизеля и подтверждающие возможность использования предлагаемого метода проектирования радиально-осевой турбины системы наддува комбинированного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный наддув, поршневой двигатель, импульсная система выпуска, радиально-осевая турбина, степень радиальности, меридиональный обвод, расчет на среднем радиусе, метод характеристик, метод Я. А. Сироткина

Research of the radial-axial turbine of the marine diesel engine impulse turbocharging system

Andrey V. Passar¹ e-mail: passar_av@mail.ru, Denis V. Timoshenko² e-mail: 000595@pnu.edu.ru,
Aleksy N. Berdnik² e-mail: alex.bdk75@yandex.ru

¹Computer center of Far East branch of the of the Russian Academy of Science, Russian Federation, ² Pacific State University, Russian Federation

Abstract. The article presents the results of research on a radial-axial turbine operating as part of a pulsed boost system for a medium-speed marine diesel engine. The research was theoretical and experimental in nature and was based on the proposed design and calculation method, which combines at certain stages of the radial-axial turbine calculation model, as well as a closed model of the combined engine workflow, allows you to solve the problems of designing the flow parts of the turbine for operation in a non-stationary flow of a pulse boost system. The aim of the research is to develop basic provisions of the proposed design method of the radial-axial turbine, which is part of pulse systems boost engine combined, for example, finding the optimal parameters of the radial-axial turbine of the turbocharger, the medium-speed marine diesel dimensions 18/22. The upgraded geometry of the flow part of the turbine is obtained. The results of experimental and computational studies of the characteristics of upgraded and standard turbines are presented, confirming the increase in the efficiency of the upgraded turbine over the entire range of its characteristics. The results of tests of the 6ChN 18/22 marine diesel engine with upgraded and standard turbines on load characteristics are presented, showing the positive effect of the changed turbine geometry on the effective performance of the diesel engine and confirming the possibility of using the proposed method of designing a radial-axial turbine of the combined engine supercharging system.

Keywords: supercharging system, piston engine, pulse exhaust system, radial-axial turbine, the degree of radial width of the impeller, meridional contour, mean-line method, method of characteristics, method J. A. Sirotkin

Введение

Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL 73/78), ограничивая эмиссию токсичных компонентов отработавших газов судовых дизелей, устанавливает также комплекс мероприятий направленных на постепенное снижение выбросов парникового газа, диоксида углерода CO₂, объектами морского транспорта. Основным инструментом достижения этой цели

приложение VI конвенции определяет судовой план управления энергоэффективностью (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP). Эффективность мероприятий оценивается двумя коэффициентами энергетической эффективности: конструктивным (Energy Efficiency Design Index, EEDI) и операционным (Energy Efficiency Operational Index, EEOI), которые фактически являются отношением объема выбросов диоксида углерода к количеству перевозимого груза.

Конструктивный коэффициент энергетической эффективности (EEDI) оценивается на стадии проектирования судна и проверяется в ходе ходовых испытаний. В числе базовые мероприятия по обеспечению требуемых значений EEDI, могут быть названы любые усовершенствования дизельных энергетических установок судов, обеспечивающие снижение удельного расхода топлива условиях реальной эксплуатации.

Форсирование дизельных двигателей любого назначения по среднему эффективному давлению p_{me} путем применения газотурбинного наддува способно обеспечить качественный рост всех эффективных показателей двигателя. Основным условием этого роста является высокая эффективность газовой турбины и компрессора, входящих в состав агрегата наддува.

Опыт проектирования газовых турбин их доводки и согласования с поршневой частью комбинированного двигателя подтверждает существенное влияние геометрии проточной части турбины, как на общий КПД турбокомпрессора, так и на величину удельного расхода топлива двигателем в целом.

Выполненные работы показывают возможность сокращения удельного эффективного расхода топлива на 6–8 г/(кВт·ч) на номинальном и близких к нему режимах только за счет изменения геометрических параметров проточной части турбины. Эти результаты нельзя считать окончательными, так как воздействия на геометрию турбины характеризовались значительной долей эмпиризма, определяемой опытом и навыками исследователей [1, 2].

Не все результаты настолько однозначны. Например, установка на исследуемый двигатель турбокомпрессора с увеличенным на 5–5,5% КПД турбины, но несколько переразмеренного по пропускной способности привела к увеличению удельного эффективного расхода топлива на 2–2,5% практически во всем диапазоне нагрузок [3].

1. Цель исследования

Анализ выполненных работ показывает, что в настоящее время отсутствуют общепризнанные хорошо отработанные методы выбора геометрических параметров проточной части газовых турбин с учетом специфики их работы в составе агрегата наддува комбинированного ДВС.

Таким образом, целью исследования является отработка основных положений предлагаемого метода проектирования радиально-осевой турбины, работающей в составе импульсной системы наддува комбинированного двигателя, на примере поиска оптимальных параметров радиально-осевой турбины турбокомпрессора среднеоборотного судового дизеля размерности 18/22.

2. Метод исследования

Главной особенностью предлагаемого метода является учет влияния поршневой части комбинированного двигателя непосредственно на стадии проектирования проточной части радиально-осевой турбины.

Метод состоит из четырех этапов. Развернутое описание каждого из этапов с подробным обоснованием применяемых методик представлено

в других работах авторов [4, 5]. Основное содержание этапов заключается в следующем.

Этап 1. На данном этапе решается задача определения оптимальных геометрических параметров проточной части турбин с применением метода расчета проточной части турбины на среднем радиусе в одномерном квазистационарном приближении [6]. В качестве метода оптимизации принят метод неопределенных множителей Лагранжа [7]. Таким образом, на этом этапе ведется проектирование турбин с варьированием набора геометрических параметров проточной части: углы выхода потока из соплового аппарата и рабочего колеса; степень радиальности рабочего колеса; высоты лопаток на входе и выходе из рабочего колеса; ширина рабочего колеса.

Этап 2. На этом этапе определяется эффективность спроектированных турбин. Для этой цели, используется модель, рассматривающая квазистационарное одномерное течение на среднем радиусе меридионального сечения, позволяющая рассчитывать основные характеристики турбины – КПД турбины, эффективную мощность и эффективное проходное сечение турбины – в функции коэффициента напора. Базовыми уравнениями модели являются уравнения энергии, расхода, моментов количества движения и адиабатического изменения состояния. Для определения потерь энергии в элементах проточной части турбины используются известные эмпирические зависимости [8].

Верификация используемой математической модели осуществлялась путем сравнения экспериментальных и расчетных характеристик ряда турбин.

Этап 3. На этом этапе проводится проверка согласованности турбин с поршневой частью двигателя и компрессором. Для этого используется замкнутая математическая модель рабочих процессов комбинированного двигателя, которая, в числе прочего, позволяет производить расчет импульса давлений в выпускном трубопроводе с учетом процессов в цилиндре двигателя, турбине и компрессоре, а также определить эффективность срабатывания этого импульса в турбине.

Данная математическая модель включает в себя следующие подмодели: модель процессов в выпускном трубопроводе, модель процессов в цилиндре двигателя и модель процессов в агрегатах наддува (турбине, компрессоре и охладителе надвучного воздуха).

Выпускной трубопровод. Математическая модель процессов в выпускном трубопроводе основана на решении смешанной задачи Коши для трубопровода постоянного поперечного сечения. Рассматривается одномерное энергоизолированное течение квазивязкого совершенного газа. С учетом принятых допущений движение газа описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка (уравнения неразрывности, движения и энергии).

При выборе метода решения данной системы предпочтение было отдано методу характеристик. В этом случае система дифференциальных уравнений гиперболического типа преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, для решения которой разработаны достаточно

эффективные численные методы, непосредственно в работе используется метод Эйлера.

Поиск численного решения осуществляется на фиксированной пространственно-временной сетке в плоскости x, t (x – длина трубопровода, t – время) с использованием ее явной разностной схемы, позволяющей вести расчет по временным слоям.

Особое место в модели занимает установление граничных условий у турбины и цилиндра.

Необходимо учесть, что поставленная цель исследования требует оценки эффективности срабатывания импульса давления в турбине с определением ее мощности, КПД и других параметров. Как следствие в работе используется следующий тип граничных условий – модель эквивалентного сопла для всей турбины, с определением эффективного проходного сечения эквивалентного сопла в ходе расчета параметров турбины. Течение через сопло принимается одномерным и изэнтропическим, что дает возможность использовать для участка «трубопровод – выходное сечение сопла» уравнения неразрывности, энергии и адиабатического изменения состояния. Эти уравнения дополняются уравнениями прямой и отраженной волн в граничном сечении на выходе из трубопровода. Полученная система алгебраических уравнений решается модифицированным методом Ньютона одновременно с расчетом параметров турбины.

Цилиндр двигателя. Для описания изменения параметров газа в цилиндре дизеля использованы уравнения первого закона термодинамики для открытых систем, уравнение массового баланса и уравнение состояния.

Одним из принципиальных вопросов при расчете рабочего процесса дизеля остается вопрос описания процесса сгорания. В работе используется «классическая» модель нулевой размерности, основанная на расчете характеристик тепловыделения [9].

Граничные условия у цилиндра – модель эквивалентного сопла с одномерным, квазистационарным, изэнтропическим течением. Связь между параметрами газа в цилиндре и трубопроводе устанавливаются: уравнение энергии, неразрывности и адиабатического изменения состояния, решаемые совместно с уравнениями прямой и отраженной волн в граничных сечениях. При этом принимается допущение о равенстве давлений на участке «минимальное сечение – входное сечение» выпускного трубопровода. Отличие от реальной картины течения учитывается коэффициентом расхода канала, что позволяет учесть потери в клапанной щели и на участке восстановления давления.

Турбина. Метод расчета характеристик турбины идентичен методу, использованному на втором (предыдущем) этапе.

Компрессор. Базовые основы математических моделей центробежного компрессора и турбины идентичны – рассматривается одномерное установившееся течение на среднем радиусе меридионального сечения с использованием уравнений неразрывности, энергии и состояния. Для учета реальной картины течения эти уравнения дополнены эмпирическими зависимостями, позволяющими учесть потери в элементах проточной

части и неоднородность потока в поперечных сечениях каналов компрессора.

Частота вращения ротора турбокомпрессора определяется в ходе расчета из баланса мощности турбины и компрессора.

Верификация представленной математической модели проводилась поэлементно путем сравнения и анализа следующих экспериментальных и расчетных данных: импульса давления перед турбиной, характеристик турбины и компрессора, нагрузочных характеристик для нескольких частот вращения.

В целом представленная математическая модель комбинированного двигателя представляет собой самостоятельный инструмент, позволяющий решать задачи согласования агрегатов наддува и поршневой части комбинированного двигателя с определением всех необходимых параметров.

Этап 4. На этом этапе производится комплексная оценка качества геометрических параметров проточной части турбины (степени радиальности, меридионального обвода рабочего колеса, ширины рабочего колеса, углов выхода потока, высот лопаток рабочего колеса). С этой целью по методу Я. А. Сироткина производится расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в проточной части турбины [10].

Данный расчет основан на численном решении нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа, описывающих квазиустановившееся течение в проточной части турбины. В результате расчета определяются поверхности тока в проточной части турбины, по форме которых можно судить о качественной картине течения, что не позволяет сделать эксперимент, а также поля скоростей во всей области проточной части, что позволяет определить возможную зону обратных токов.

Проверка адекватности метода производилась путем сравнения расчетных и экспериментальных полей скорости в выходном сечении турбины.

Здесь необходимо сделать следующее замечание. На сегодняшний день на рынке программного обеспечения имеется множество коммерческих пакетов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD), позволяющих производить расчет пространственного течения в турбинах [11, 12]. Использование этих пакетов заключается в решении численными методами двумерных и трехмерных уравнений описывающих течение в турбомашине. Эти пакеты включают разнообразные модели турбулентности.

Например, в исследованиях двумерного и трехмерного течений в малорасходной осевой турбине с использованием пакета *ANSYS CFX* время расчета только двумерного течения занимало в среднем около 2 часов [13]. При этом расчет производился на компьютере *Core i 5*, с тактовой частотой 2,7 ГГц и оперативной памятью 16 Гб.

Для сравнения, расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемого газа в рабочем колесе центробежной турбины с радиусом колеса 70 мм, выполненный по методу Я. А. Сироткина, занимал в среднем около 0,32 с при расчете на персональной ЭВМ средней производительности [14, 15].

Таким образом, по затратам машинного времени метод Я. А. Сироткина оказывается заметно эффективнее полноценного CFD-моделирования. С учетом меньшего объема исходных данных и достаточной точности для решения поставленных задач, предпочтение в представленной работе было отдано этому методу.

3. Основные результаты

Рассмотренный метод послужил базой комплекса исследований радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-14С.27 среднеоборотного судового дизеля 6ЧН 18/22.

На первом этапе исследовалось влияние набора геометрических параметров рабочего колеса на структуру течения в проточной части [14 – 18]. Рассматривались следующие параметры:

- степень радиальности;
- форма меридионального контура;
- осевая ширина рабочего колеса;
- высота лопаток;
- угол выхода потока из рабочего колеса.

Исследования проводились для номинального режима работы двигателя. Расчетная величина полного давления на входе в турбину – 0,22 МПа.

В результате проведенных исследований были получены оптимальные геометрические параметры проточной части радиально-осевой турбины:

- степень радиальности $\mu = 0,57$;
- осевая ширина рабочего колеса $B = 0,3 d_1$;
- угол выхода потока $\beta_2 = 32^\circ$.
- оптимальная форма меридионального контура – эллиптическая кривая.

По результатам проведенных исследований было изготовлено рабочее колесо. Эскизы модернизированной и штатной рабочих колес турбины представлены на рис. 1.

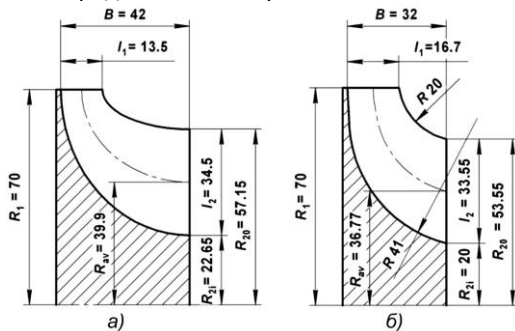


Рис. 1. Рабочие колеса турбин:
а) модернизированное (угол выхода потока $\beta_2 = 32^\circ$);
б) штатное (угол выхода потока $\beta_2 = 37^\circ$)

На следующем этапе исследований проводился анализ эффективности штатной и модернизированной турбин, для чего были получены и сопоставлены их экспериментальные и расчетные характеристики.

Экспериментальные характеристики определялись путем «холодной» продувки на испытательном стенде с использованием типовой методики обработки результатов эксперимента. Расчетные характеристики с помощью математической модели, представлены выше.

Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик турбин подтвердило увеличение

эффективности модернизированной турбины, а также еще раз доказало адекватность применяемых математических моделей. Хорошо видно, что во всем диапазоне изменений коэффициента напора модернизированная турбина имеет более высокий КПД и превосходит её по мощности – рис. 2 и 3.

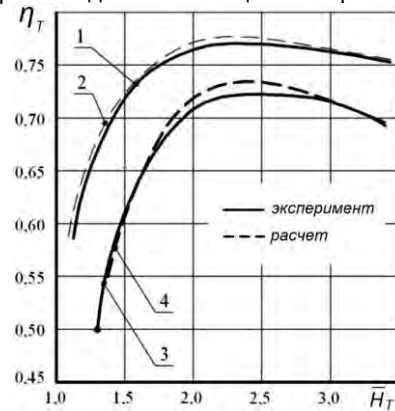


Рис. 2. Зависимость эффективного КПД турбин от коэффициента напора:

1 и 2 – модернизированная турбина;
3 и 4 – штатная турбина

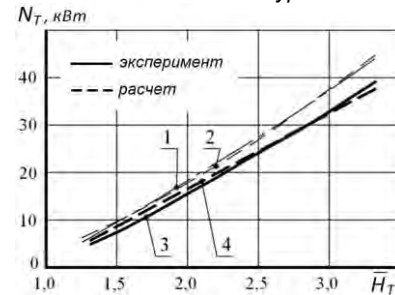


Рис. 3. Зависимость эффективной мощности турбин от коэффициента напора (обозначения аналогичны рис. 2)

На последнем этапе исследований выполнялась комплексная оценка эффективности выбранных геометрических параметров проточной части турбины турбокомпрессора ТКР-14С.27. Экспериментальные нагрузочные характеристики, полученные при $n = 750 \text{ мин}^{-1}$, показали, что модернизированная турбина позволяет снизить удельный эффективный расхода топлива по всей характеристике, причем на номинальном режиме это снижение достигает 3% (до 6 г/(кВт·ч)) – рис. 4.

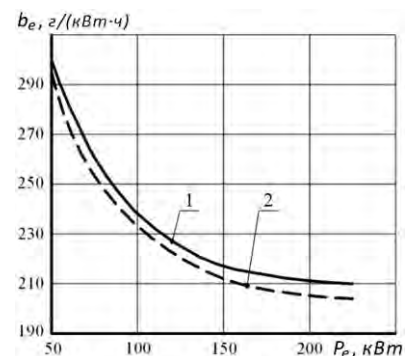


Рис. 4. Нагрузочные характеристики дизеля 6ЧН 18/22:

1 – дизель со штатной турбиной;
2 – дизель с модернизированной турбиной

Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Подтверждена работоспособность предлагаемого метода проектирования радиально-осевой турбины, работающей в составе импульсной системы наддува комбинированного двигателя.
2. Получены новые данные, позволяющие с большим обоснованием подходить к выбору геометрических параметров проточной части

радиально-осевых турбин в задачах проектирования и модернизации агрегатов наддува.

3. Для объекта исследований – среднеоборотного судового дизеля, проведена модернизация проточной части радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-14С.27, обеспечивающая повышение КПД и эффективной мощности во всем диапазоне ее характеристики. Подтверждено улучшение эффективных показателей исследуемого дизеля при установке модернизированной турбины.

Литература

1. Ципленкин Г. Е. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г.Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. – 2014. – № 2 (256). – С. 16–22.
2. Ципленкин Г. Е. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. – 2014. – № 4 (258). – С. 19–28.
3. Turbocharger, efficiency and the diesel engine / J. Schiemman. 1996. – Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/77547b9dbf02d66ec1257880005681d3/ABB%20Turbocharging_Operating%20turbochargers.pdf (дата обращения 20.09.2020).
4. Лашко В. А. Метод проектирования проточной части радиально-осевой турбины комбинированного двигателя / В. А. Лашко, А. В. Пассар // Двигателестроение. – 2011. – № 3 (245). – С. 13–19.
5. Пассар А. В. Комплексный метод расчета проточной части радиально-осевой турбины турбокомпрессора ТКР-14 / А. В. Пассар, Д. В. Тимошенко // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 5. – С. 31–35.
6. Степанов Г. Ю. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей / Г. Ю. Степанов. – М.: Машгиз, 1958. – 350 с.
7. Чумаков Ю. А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей / Ю. А. Чумаков. – М.: ИНФРА-М; Форум, 2012. – 448 с.
8. Лашко В. А. Расчет коэффициента потерь кинетической энергии в проточной части турбины как одна из проблем реализации комплексного подхода / В. А. Лашко, А. В. Пассар // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 1(20). – С. 79–90.
9. Петров В. А. Математическое описание характеристик тепловыделения в турбопоршневых двигателях на различных режимах / В. А. Петров, В. А. Алексеев // Двигателестроение. – 1981. – № 6. – С. 3–5.
10. Сироткин Я. А. Расчет осесимметричного вихревого течения невязкой сжимаемой жидкости в радиальных турбомашинах / Я. А. Сироткин // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение. – 1963. – № 3. – С. 16–28.
11. Kou H. J. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed / H. J. Kou, J. S. Lin, J. H. Zhang // Journal of Aerospace Engineering. – 2015. – № 230(6). – pp. 1044–1058. DOI: 10.1177/0954410015603071.
12. Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine / P. Newton, R. Martinez-Botas, M. Seiler // Journal of Turbomachinery. – 2014. – V. 137. – pp. 1–10. DOI: 10.1115/1.4028217.
13. Епифанов А. А. Численное моделирование трехмерного течения в решетках и ступенях малорасходных турбин. ЛПИ: автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2012.– 14 с.
14. Passar A. V. Research of radiality degree effect on stream structure in a flow range of radial-axial turbine in a gas-turbine plant / A. V. Passar, D. V. Timoshenko // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2017. – Vol. 328. – № 5. – p. 24–38.
15. Passar A. V. Influence of meridian contour form in a driving wheel on gas flow parameters in a radially-axial turbine of a gas-turbine plant / A. V. Passar // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2017. – Vol. 328. – № 9. – p. 33–48.
16. Пассар А. В. Влияние ширины рабочего колеса на эффективность радиально-осевой турбины / А. В. Пассар // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 4 (53). – С. 61–73.
17. Passar A. V. Influence of blade height in centripetal turbine impeller on flow gas dynamic / A. V. Passar // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2019. – Vol. 330. – № 12. – p. 54–63.
18. Пассар А. В. Влияние угла выхода потока газа из рабочего колеса турбины на эффективность её работы в составе комбинированного двигателя / А. В. Пассар // Машиностроение и инженерное образование. – 2019. – № 4 (61). – С. 2–12.

References

1. Tsipenkin G. E., Iovlev V. I. (2014) Uluchshenie toplivnoy ekonomichnosti dvigateley za schet optimizatsii sistem nadduva [Improve engine fuel efficiency by optimizing boost systems]. Dvigatelistroenie. 2014. No2 (256). Pp. 16–22.
2. Tsipenkin G. E., Iovlev V. I. (2014) Uluchshenie toplivnoy ekonomichnosti dvigateley za schet optimizatsii sistem nadduva [Improve engine fuel efficiency by optimizing boost systems]. Dvigatelistroenie. 2014. No4 (258). Pp. 19–28.
3. Turbocharger, efficiency and the diesel engine / J. Schiemman. 1996. – Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/77547b9dbf02d66ec1257880005681d3/ABB%20Turbocharging_Operating%20turbochargers.pdf.

4. Lashko V. A., Passar A. V. (2011) Metod proektirovaniya protochnoy chasti radialno–osevoy turbiny kombinirovannogo dvigatelya [Method of designing the flow part of a radial-axial turbine of a combined engine]. Dvigatelsestroenie. 2011. No3 (245). Pp. 13–19.
5. Passar A. V., Timoshenko D. V. (2015) Kompleksnyy metod rascheta protochnoy chasti radialno–osevoy turbiny turbokompressora TKR–14 [Integrated method for calculating the flow part of the radial-axial turbine of the TKR–14 turbocharger]. Avtomobilnaya promyshlennost. 2015. No5. Pp. 31–35.
6. Stepanov G. YU. Osnovy teorii lopatochnykh mashin, kombinirovannykh i gazoturbinnnykh dvigateley [Fundamentals of the theory of shovel machines, combined and gas turbine engines]. Mashgiz. 1958. 350 p.
7. CHumakov YU. A. Teoriya i raschet transportnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Theory and calculation of transport gas turbine engines]. Moscow. INFRA–M, Forum. 2012. 448 p.
8. Lashko V. A., Passar A. V. (2011) Raschet koeffitsiyenta poter kineticheskoy energii v protochnoy chasti turbiny kak odna iz problem realizatsii kompleksnogo podkhoda [Calculation of the coefficient of kinetic energy loss in the flow part of the turbine as one of the problems of implementing an integrated approach]. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. No1(20). Pp. 79–90.
9. Petrov V. A., Alekseyev V. A. Matematicheskoye opisaniye kharakteristik teplovydeleniya v turboporshnevnykh dvigatelyakh na razlichnykh rezhimakh [Mathematical description of heat release characteristics in turbo-piston engines in various modes]. Dvigatelsestroyeniye. 1981. No6. Pp. 3 – 5.
10. Sirotkin YA. A. Raschet osesimmetrichnogo vikhrevogo techeniya nevyazkoy szhimayemoy zhidkosti v radialnykh turbomashinakh [Calculation of axisymmetric vortex flow of inviscid compressible fluid in radial turbomachines]. Izv. AN SSSR, OTN, Mekhanika i mashinostroyeniye. 1963. No3. Pp. 16–28.
11. Kou H. J. Numerical study on vibration stress of rotating fan blade under aerodynamic load at critical speed / H. J. Kou, J. S. Lin, J. H. Zhang // Journal of Aerospace Engineering. – 2015. – № 230(6). – pp. 1044–1058. DOI: 10.1177/0954410015603071.
12. Newton P., Martinez-Botas R., Seiler M. A three-dimensional computational study of pulsating flow inside a double entry turbine / P. Newton, R. Martinez-Botas, M. Seiler // Journal of Turbomachinery. – 2014. – V. 137. – pp. 1–10. DOI: 10.1115/1.4028217.
13. YEpifanov A. A. CHislennoye modelirovaniye trekhmernogo techeniya v reshetkakh i stupenyakh maloraskhodnykh turbin [Numerical simulation of three-dimensional flow in lattices and stages of low-flow turbines]. LPI. avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. SPb. 2012. 14 p.
14. Passar A. V. Research of radiality degree effect on stream structure in a flow range of radial-axial turbine in a gas-turbine plant / A. V. Passar, D. V. Timoshenko // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2017. – Vol. 328. – № 5. – p. 24–38.
15. Passar A. V. Influence of meridian contour form in a driving wheel on gas flow parameters in a radially–axial turbine of a gas-turbine plant / A. V. Passar // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2017. – Vol. 328. – № 9. – p. 33–48.
16. Passar A. V. (2017) Vliyaniye shiriny rabocheho koleasa na effektivnost radialno-osevoy turbiny [Influence of the impeller width on the efficiency of a radial-axial turbine]. Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovaniye. 2017. No4 (53). Pp. 61–73.
17. Passar A. V. Influence of blade height in centripetal turbine impeller on flow gas dynamic / A. V. Passar // Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo Assets engineering. – 2019. – Vol. 330. – № 12. – p. 54–63.
18. Passar A. V. (2019) Vliyaniye ugla vykhoda potoka gaza iz rabocheho koleasa turbiny na effektivnost yeye raboty v sostave kombinirovannogo dvigatelya [Influence of the gas flow exit angle from the turbine impeller on the efficiency of its operation as part of a combined engine]. Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovaniye. 2019. No4 (61). Pp. 2–12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Владимирович Пассар, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Вычислительный центр ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, e-mail: passar_av@mail.ru

Andrey V. Passar, Ph.D. (Eng), senior researcher Computer center of Far East branch of the of the Russian Academy of Science, Kim Yu Chena, 65, Khabarovsk, 680000, Russian Federation, e-mail: passar_av@mail.ru

Денис Владимирович Тимошенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: 000595@pnu.edu.ru

Denis V. Timoshenko, Ph.D. (Eng), associate professor of department of Internal Combustion Engines, Pacific State University, Tihookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: 000595@pnu.edu.ru

Алексей Николаевич Бердник, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, e-mail: alex.bdk75@yandex.ru

Aleksey N. Berdnik, Ph.D. (Eng), associate professor of department of Internal Combustion Engines, Pacific State University, Tihookeanskaya, 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, e-mail: alex.bdk75@yandex.ru

Поступила в редакцию: 20.12.2020
Принята к публикации: 05.05.2021

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 621.375.826

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.012>

Лазерные технологии передачи данных в водной среде в вопросах организации подводных беспроводных сетей связи

В.Л. Мартынов¹ e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru, В.И. Дорошенко¹ e-mail: morechod1954@yandex.ru,
Н.М. Божук¹ e-mail: bozhuknm@gumrf.ru, Ю.Г. Ксенофонтов² e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

²Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

Аннотация. Решению вопросов, связанных с телекоммуникационным оборудованием, функционирующем в водной среде, в настоящее время уделяется особое внимание. На смену традиционным подводным системам обмена информацией в гидроакустических полях приходят открытые системы её оптической передачи и приёма, базирующиеся на лазерных технологиях. Это вызвано необходимостью трансляции с высокой разрешающей способностью видеоданных, среди которых, например, может быть либо визуальное отображение подводных систем в динамике, либо результаты мониторинга объектов подводной инфраструктуры в реальном масштабе времени, либо что-то другое с учётом требований Заказчика. Канал передачи такого большого объёма информации при условии её считывания с задаваемым качеством должен иметь пропускную способность более 1 Мбит/с. Такую высокую скорость передачи невозможно реализовать в подводных гидроакустических системах, граница технических возможностей которых на превышает 10...50 кбит/с. В аналогичной ситуации при заданных параметрах канала связи частоты несущих оптического диапазона имеют порядок 10^{14} Гц, что обеспечивает динамический диапазон полосы пропускания в районе $10^{12}...10^{13}$ Гц. С учётом условия квазимонохроматичности применение гидроакустических средств для передачи видеоданных становится проблематичным, так как техническая реализация такой задачи потребует слишком большого времени. С учётом сказанного, преимуществом подводных беспроводных оптических систем связи является их высокая широкополосность, которая обеспечит высокую скорость передачи данных. В статье обосновывается целесообразность использования открытых оптических системы связи для создания высокоскоростных подводных инфотелекоммуникаций, среди которых наиболее предпочтительными являются лазерные системы.

Ключевые слова: подводная инфраструктура, лазерные технологии, гидроакустические средства, оптические системы, подводный аппарат, беспроводная связь, технические средства, полоса пропускания.

Laser technologies of data transfer in aquatic environment in the organization of underwater wireless communication networks

Victor L. Martynov¹ e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru, Victor I. Doroshenko¹ e-mail: morechod1954@yandex.ru,
Nicolay M. Bozhuk¹ e-mail: bozhuknm@gumrf.ru, Yuriy G. Ksenofontov² e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, ²Saint Petersburg state University of the state fire service of the EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. Special attention is currently paid to the solution of issues related to telecommunication equipment operating in the aquatic environment.

The traditional underwater systems for the exchange of information in hydroacoustic fields are being replaced by open systems for its optical transmission and reception, based on laser technologies. This is due to the need to broadcast high-resolution video data, among which, for example, there can be either a visual display of underwater systems in dynamics, or the results of monitoring objects of underwater infrastructure in real time, or something else, taking into account the requirements of the Customer. The transmission channel of such a large amount of information, provided it is read with a specified quality, must have a bandwidth of more than 1 Mbit / s. Such a high transmission rate cannot be realized in underwater sonar systems, the technical capabilities limit of which does not exceed 10 ... 50 kbit/s. In a similar situation, given the parameters of the communication channel, the carrier frequencies of the optical range are 10^{14} Hz, which provides a dynamic bandwidth range about $10^{12}...10^{13}$ Hz. Taking into account the condition of quasimonochromaticity, the use of hydroacoustic means for transmitting video data becomes problematic, since the technical implementation of such a task will take too long. In view of the above, the advantage of underwater wireless optical communication systems is their high broadband, which will provide a high data transfer rate. The article substantiates the expediency of using open optical communication systems for creating high-speed underwater information telecommunications, among which the most preferable are laser systems.

Keywords: underwater infrastructure, laser technologies, hydroacoustics, optical systems, underwater vehicle, wireless communication, technical means, bandwidth.

Введение

Освоению Арктики в нашей стране всегда уделяли большое внимание, однако, в СССР в силу ряда объективных причин всё сводилось к решению

ограниченного круга задач. В связи с современной утвержденной концепцией развития арктического региона РФ, ставится задача в максимально короткие сроки повысить потенциал использования и дополнительного его оснащения специальными техническими средствами. Соответственно,

реализуя данную концепцию, невозможно обойтись без научной базы в вопросах создания поисковых и разведывательных систем, при помощи которых можно будет определить перспективы, проблемы и цели, связанные с освоением северных территорий. Основными целями здесь являются:

- обеспечение безопасности северных границ;
- мониторинг изменения климата;
- поиск и добыча энергоресурсов;
- добыча рыбы и морепродуктов.

Эффективность их достижения зависит от организации функционирования подводных телекоммуникаций. Основным требованием, определяющим актуальность подводных телекоммуникаций, является передача большого объема информации в единицу времени. Высокую скорость передачи данных в водной среде способна обеспечить система с пропускной способностью не менее 1 Мбит/с.

В настоящее время системы связи, обеспечивающие обмен информацией в гидросфере между корреспондентами, можно разделить на две основные группы: проводная и беспроводная связь. В системах проводной связи широко используются электрические и оптические кабели. Практически, они обладают неограниченной дальностью при использовании стационарных подводных станций. Однако, при подключении динамичных подводных аппаратов (ПА) у таких систем сказываются трудности, характеризующие их недостатки, среди которых:

- стыковка и наличие трудно реализуемых требований к её проведению;
- ограничение маневренности ПА во время сеанса передачи данных;
- относительно небольшая дальность связи, вызванная конечной длиной кабеля;
- специфичные конструктивные особенности глубинных кабелей и требований к их стыковке с ПА, что касается кабельных вводов.

Беспроводная связь лишена всех вышеперечисленных недостатков.

1. Подводные телекоммуникации на базе лазерных технологий

Не вызывает сомнений, что в настоящее время наиболее простым и недорогим средством реализации подводной беспроводной связи на дальностях в десятки километров являются гидроакустические системы. Однако, при работе в придонных и приповерхностных слоях на мелководье из-за большого числа отражений акустических сигналов от грунта и кромки воды возникает многолучевая помеха, что требует дополнительных ресурсов на машинную обработку сигналов. При этом следует отметить, что разборчивость речи и стабильность управления ПА не соответствует предъявляемым к ней требованиям. Особенность проблемы, определяющая её актуальность, заключается в том, что только системы связи на базе лазерных технологий способны обеспечить передачу видеоизображения или другой «объемной» информации, так как только они обладают возможностью передачи данных со скоростью не менее 1 Мбит/с. Для сравнения - пропускная способность гидроакустического канала не превышает 50 кбит/с, то есть на два порядка ниже. В

соответствии с условием квазимонохроматичности, ширина спектра сигнала должна быть на 1...2 порядка меньше значения его средней частоты.

Особенность оптического диапазона – это использование несущих частот, значения которых составляют порядка 10^{14} Гц. При таком условии ширина полосы пропускания канала передачи может составлять $10^{12}...10^{13}$ Гц, что практически исключает применение гидроакустических средств.

С учётом сказанного, авторами предлагается при выборе подводного телекоммуникационного оборудования исследовать лазерные системы, способные обеспечить передачу большого массива данных с высокой скоростью. Для обоснования этого рассмотрим следующий пример. Согласно [5], учёными Университета науки и технологий (KUAST) разработана технология двустороннего беспроводного соединения для обмена данными между корреспондентами под водой, идея которого представлена на рисунке 1:

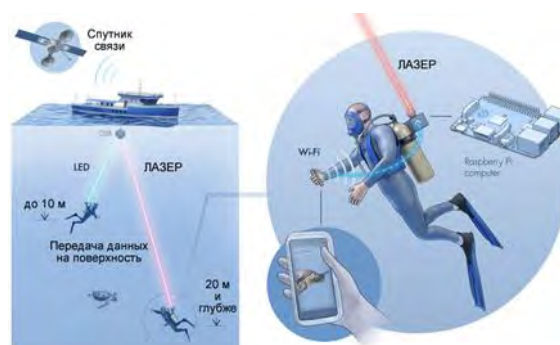


Рис. 1 – Вариант организации сети передачи данных с использованием подводных беспроводных систем связи на базе лазерных технологий

Полученные научные результаты позволили преобразовать стандартный беспроводной сигнал для его трансляции по лазерному лучу в толще воды, при этом передача осуществляется с буйа, находящегося на поверхности водной акватории.

Разработанные технологии дают возможность обеспечить попадание лазерного пучка зелёного диапазона длин волн на фотодетектор, размещаемый на приёмном конце в расстоянии порядка десятков метров, что показано на правом рисунке 1. Разработчиками указанной системы подводной телекоммуникации заявлено, что скорость передачи данных составила 2,11 Мбит/с. Ограничивающим фактором при проведении испытаний исследователи назвали проблему, связанную с выбором мощности лазерного излучателя – при превышении допустимого порога фотодетектор выходил из строя от перегрева. Тем не менее, полученный практический результат доказывает возможность и перспективность реализации технологий для создания подводных телекоммуникаций на базе лазерных систем. Рассмотрим, как изменение характеристики лазерных систем способно влиять на характеристики водной среды, то есть на её показатель ослабления, а, следовательно, на подводные телекоммуникации.

2. Влияние мощности лазерных излучателей на характеристики водной среды

Электрическая напряженность светового поля обычных (прожекторных) источников света составляет от 1 до 100 В/см. Это намного меньше, чем в молекулах и атомах вещества ($10^8 \dots 10^{10}$ В/см) [6]. При такой разнице соотношения сил световая волна не может оказывать никакого влияния на физические параметры вещества.

Благодаря применению лазеров интенсивность света I может находиться в диапазоне $10^7 \dots 10^9$ Вт/см², в то время как мощные лазерные установки обеспечивают интенсивность I светового излучения до 10^{16} Вт/см². Напряженности светового поля E (интенсивность светового потока I прямо пропорциональна E^2) в указанных пучках относительно соизмеримы и в большинстве случаев не превышают внутриатомные поля. Из этого следует, что распространение лазерных лучей в воде происходит под непосредственным воздействием самой воды на свет в виде поглощения, рассеяния, сдвига фазы волны, а также под воздействием света на вещество (воду). Это становится главной причиной возникновения нелинейных оптических эффектов [7].

В случае, когда мощность светового пучка в водной среде находится выше определенного критического значения $P_{кр}$, может получиться обратный эффект: вместо дифракционной расходимости пучка может иметь место его сжатие. Значения $P_{кр}$ для различного рода жидкостей находятся в пределах 10...50 кВт. Сам по себе эффект сжатия в каком-то смысле имеет схожесть с фокусировкой пучка традиционной линзой, а самофокусировка объясняется тем, что в мощном световом поле происходит изменение показателя преломления среды n . Когда знак изменения n становится таким, что все пространство, занятое пучком, имеет большую оптическую плотность, то периферийные лучи могут падать в центр этого пучка – рисунок 2:

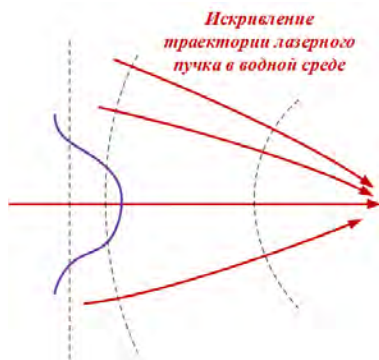


Рис. 2 – Процесс изменения хода периферийных лучей и самофокусировка света в среде

Фазовые фронты и ход лучей в ограниченном пучке показаны на рис. 2. Сам пучок распространяется с показателем преломления [7]:

$$n = n_0 + n_1 \cdot E, \quad (1)$$

где: n_0 – постоянная составляющая, которая полностью не зависит от значения E ;

$n_1 \cdot E$ – изменение показателя преломления, значение которого определяется величиной E , при этом n_1 всегда больше нуля.

На рисунке 2 направления стрелок указывают ход лучей, сплошной линией показано распределение интенсивности света пунктиром – поверхности постоянной фазы. Поскольку фазовая скорость света определяется выражением [7]:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{n + n_1 \cdot E^2}, \quad (2)$$

а поле E на оси больше, чем на периферии, то фазовые фронты изгибаются, и лучи отклоняются к оси пучка. При этом среда представляет собой объемную нелинейную собирающую линзу, у которой фокус находится на расстоянии f от входа пучка в среду – рисунок 3а:

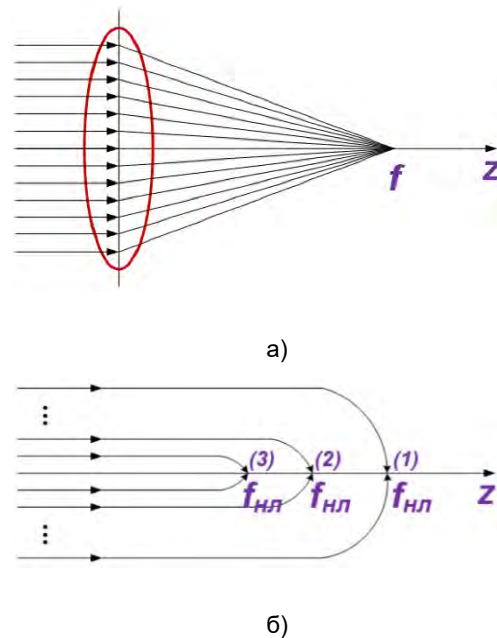


Рис. 3 – Трассы хода лучей

Световой пучок с поперечным радиусом d (рисунок 3а) фокусируется d в на расстоянии f [3]:

$$f \approx d \cdot \left(\frac{n_0}{\Delta n_{нл}} \right)^2, \quad (3)$$

где: n_0 – показатель преломления вне пучка, $\Delta n_{нл}$ – перепад показателя преломления в пучке вследствие нелинейной рефракции.

Процесс фокусировки светового пучка традиционной линзой показан на рисунке 3а, а фокусировка в нелинейной среде, что называется самофокусировкой – рисунок 3б. В итоге, самофокусировка светового излучения наступает в том случае, когда нелинейная рефракция подавляет неизбежную дифракционную расходимость пучка [7]:

$$\frac{\Delta n_{нл}}{n_0} > \theta_p^2, \quad (4)$$

где: θ_p – угол дифракционной расходимости.

После первого фокуса при самофокусировке света могут появиться и следующие, что образует многофокусную структуру. Общее число фокусов растёт с увеличением мощности источника излучения, и они приближаются ко входу в нелинейную среду - рисунок 3б.

В ходе проведения соответствующего эксперимента выявлено, что реальном лазерном импульсе мощность изменяется с течением времени, что приводит к изменению длины нелинейной линзы, то есть $\Delta l_{нл}$ является функцией времени (скорость его движения приблизительно 10^{10} см/с. Лазерный пучок, в котором сосредоточена критическая мощность, в нелинейной среде сохраняет свою форму - рисунок 3б, то есть образует стационарный диэлектрический волновод.

Чтобы приблизительно показать связь между статической диэлектрической проницаемостью ϵ неполярного диэлектрика и поляризуемостью α его молекул, а также от их числа N в 1 см^3 (частицы одного сорта) существует формула Клаузиуса-Моссотти [8]:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} \cdot N_A \cdot \alpha, \quad (5)$$

Иногда данная формула принимает вид:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi}{3} \cdot N_A \cdot \alpha, \quad (6)$$

где: M – молекулярная масса вещества, ρ – плотность вещества, N_A – число Авогадро.

При динамической диэлектрической проницаемости и чисто электронной поляризуемости для частот одного диапазона формула Клаузиуса-Моссотти превращается в формулу Лоренц-Лоренца [8]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N \cdot \alpha_{эл}, \quad (7)$$

где: N – число поляризующихся частиц в единице объема;

$\alpha_{эл}$ – электронная поляризуемость частиц.

Когда присутствует смесь из k веществ правая часть (7) заменяется на сумму k членов:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot N_i \alpha_{эл}^i \quad (i = 1, 2, \dots, k), \quad (8)$$

каждый из которых относится лишь к одному из этих веществ (сумма всех N_i равна N).

Наиболее вероятным механизмом возникновения нелинейного отклика в диапазоне оптических частот является электронная поляризация среды. Рассчитаем, как изменяется показатель преломления воды (H_2O) под действием мощного высокочастотного излучения. Молярная масса воды $M = 18 \text{ г/моль}$ без учета имеющихся комплексов [9].

Плотность $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$ (дистиллированная вода при $T \approx 300\text{К}$). Плотность воды (жидкое состояние) достигает максимального значения при $T = 4^\circ\text{C}$ [9].

Количество молекул в единице объема (концентрация):

$$N = \frac{\rho \cdot N_A}{M} = \frac{1 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{18} \approx 3,34 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}, \quad (9)$$

Концентрация атомов равна [5]:

$$N_H = 2N \approx 6,70 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

$$N_O = N \approx 3,34 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

Электронная поляризуемость атомов (ионов) в соответствии с [10, 11] составляет:

$$H^+ : \alpha_H = 0,67 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$$

$$O^{2-} : \alpha_O = 3,88 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3.$$

По формуле Лоренц – Лоренца имеем:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \sum_i N_i \cdot \alpha_i = \xi \approx 0,73, \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{2 \cdot \xi + 1}{1 - \xi} \approx 9,11, \quad (11)$$

В соответствии с (10) показатель преломления среды в результате действия лазерного излучения достигает значения [12]:

$$n = \sqrt{\epsilon} \approx \sqrt{9,11} \approx 3,018 \approx 3.$$

Табличные значения в примерно 2,27 раза меньше:

$$\epsilon = 1,77 \text{ и } n = 1,33.$$

Завышение значения показателя преломления среды ϵ относительно табличного обусловлено переходом системы в состояние с поляризацией ионов H^+ и O^{2-} вследствие воздействия электромагнитного излучения. Такая значительная разница показателей преломления приводит к возникновению самофокусировки, что недопустимо, так как может оказать негативное влияние на функционирование подводных телекоммуникаций в целом. Возможно, это скажется на траектории лазерного луча, кроме того, нельзя исключать и возникновение явления оптического пробоя. Не исключено, также, что никакого негативного влияния увеличение мощности лазерного излучения не окажет созданию подводных телекоммуникаций. Ответ может быть получен в результате проведения специального эксперимента в реальных условиях.

Заключение

Результаты исследований и экспериментов, проведённых авторами, показывают, что в качестве средств подводной беспроводной связи может быть использовано телекоммуникационное оборудование на основе лазерных технологий. Передача большого объёма данных с высокой скоростью возможна в системах с пропускной способностью 1 Мбит/с и более, с чем не способна справиться никакая

гидроакустическая система. Поэтому, для создания подводных телекоммуникаций целесообразно использовать оптические системы связи, среди которых наиболее предпочтительны именно лазерные.

Следует отметить, что результаты проведенных исследований явились подтверждением возможности реализации эффектов

самофокусировки в водной среде. Пока не совсем ясно, как это может сказаться на эффективности подводных телекоммуникаций. Ответ на вопрос о возможном влиянии изменения показателя ослабления ϵ водной среды на оси лазерного излучателя может дать дальнейшее проведение соответствующих экспериментов.

Литература

1. N M Bozhuk, I L Skripnik, Yu G Ksenofontov, V P Malyshev and M O Avdeeva. Integrity of information data flow in meteor communication networks MIST: Aerospace-III 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) 012139 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1047/1/012139.
2. Мартынов В.Л., Скрипник И.Л., Ксенофонтов Ю.Г. Влияние помехи обратного рассеяния на эффективность инфотелекоммуникаций при проведении подводного поиска // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал. 2020. № 3. Том 1. С. 142-148. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.019.
3. Божук Н. М., Каверзнева Т. Т., Скрипник И. Л., Ксенофонтов Ю. Г., Щербакова И. О. Подходы к оценке эффективности разрабатываемых новых образцов техники в процессе осуществления инженерно-технической деятельности // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2020. Том 9. № 3 (51). С. 80-85. DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0013.
4. I L Skrypnik, Yu G Ksenofontov, T T Kaverzneva, N V Rumyantseva, V V Kiss. Assessment of technical level of new, promising models of equipment at the stage of their development in modern engineering practice. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 042031. doi:10.1088/1757-899X/862/4/042031.
5. TC Join Extra Crunch.URL: <https://techcrunch.com/2020/07/15/researchers-develop-laser-based-underwater-wifi-system-for-sub-sea-data-networks/>. (дата обращения 14.04.2021).
6. Тарасов Л.В. Лазеры: действительность и надежды. М., Наука, 1985, 176 с.
7. Дмитриев В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М., Физматлит, 2001, 256 с.
8. Н. Мотт, Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах. М., Изд. ин. лит., 1950, 304 с.
9. Глинка Н.Л. Общая химия: учебное пособие для ВУЗов. Л., Химия, 1988, 704 с.
10. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. М., Наука, 1978, 792 с.
11. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомных ионов: справочник. М., Энергоатомиздат, 1986, 344 с.
12. Мартынов В. Л., Родионов А. А. Формирование эффекта самоканалирования лазерного пучка в водной среде // Тезисы докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции «Современное телевидение», ФГУП «МКБ «Электрон», Москва, 2005 г. С. 40-43.

References

1. N M Bozhuk, I L Skripnik, Yu G Ksenofontov, V P Malyshev and M O Avdeeva. Integrity of information data flow in meteor communication networks MIST: Aerospace-III 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) 012139 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1047/1/012139.
2. Martynov V.L., Skripnik I.L., Ksenofontov YU.G. Vliyaniye pomexi obratnogo rasseyaniya na effektivnost' infotelekomunikacij pri provedenii podvodnogo poiska [Effect of backscattering interference on the efficiency of infotelecommunication during underwater search] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. Nauchnyj zhurnal. 2020. № 3. Tom 1. S. 142-148. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.019.
3. Bozhuk N. M., Kaverzneva T. T., Skripnik I. L., Ksenofontov YU. G., SHCHerbakova I. O. Podhody k ocenke effektivnosti razrabatyvaemykh novykh obrazcov tekhniki v processe osushchestvleniya inzhenerno-tekhnicheskoy deyatel'nosti [Approaches to assessing the effectiveness of new engineering models being developed] // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2020. Tom 9. № 3 (51). S. 80-85. DOI: 10.46548/21vek-2020-0952-0013.
4. I L Skrypnik, Yu G Ksenofontov, T T Kaverzneva, N V Rumyantseva, V V Kiss. Assessment of technical level of new, promising models of equipment at the stage of their development in modern engineering practice. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 042031. doi:10.1088/1757-899X/862/4/042031.
5. TC Join Extra Crunch.URL: <https://techcrunch.com/2020/07/15/researchers-develop-laser-based-underwater-wifi-system-for-sub-sea-data-networks/>. (data obrashcheniya 14.04.2021).
6. Tarasov L.V. Lazery: dejstvitel'nost' i nadezhdy [Lasers: Reality and Hope]. M., Nauka, 1985, 176 s.
7. Dmitriev V.G. Nelinejnaya optika i obrashchenie volnovogo fronta [Nonlinear optics and wavefront reversal]. M., Fizmatlit, 2001, 256 s.
8. N. Mott, R. Gerni. Elektronnyye processy v ionnykh kristallakh [Electronic processes in ionic crystals]. M., Izd. in. lit., 1950, 304 s.
9. Glinka N.L. Obshchaya himiya: uchebnoe posobie dlya VUZov [General chemistry: tutorial for universities]. L., Himiya, 1988, 704 s.
10. CH. Kiteľ. Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Introduction to Solid State Physics]. M., Nauka, 1978, 792 s.
11. Radcig A.A., Smirnov B.M. Parametry atomov i atomnykh ionov [Parameters of atoms and atomic ions]: spravochnik. M., Energoatomizdat, 1986, 344 s.
12. Martynov V. L., Rodionov A. A. Formirovaniye effekta samokanalirovaniya lazernogo puchka v vodnoy srede [Formation of laser beam self-analysis effect in aqueous medium] // Tezisy dokladov XIII Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Sovremennoe televideniye», FGUP «MKB «Elektron», Moskva, 2005 g. S. 40-43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Леонидович Мартынов, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Виктор Иванович Дорошенко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: morechod1954@yandex.ru

Николай Михайлович Божук, кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: bozhuknm@gumrf.ru

Юрий Геннадьевич Ксенофонтов, кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университета государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Victor L. Martynov, Dr.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

Victor I. Doroshenko, Dr.Sc. (Eng.), Professor, Associate Professor, Professor of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: morechod1954@yandex.ru

Nicolay M. Bozhuk, Ph.D (Pedagogic), Associate Professor, Head of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: bozhuknm@gumrf.ru

Yuriy G. Ksenofontov, Ph.D (Eng.), Associate Professor of the Department of fire safety of technological processes and productions, Saint Petersburg state University of the state fire service of the EMERCOM of Russia, 196105, Saint Petersburg, Russia, e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.3.2021
Принята к публикации: 15.04.2021

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.6

[https://doi.org/ 10.37220/MIT.2021.52.2.013](https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.013)

Оценка экологической эффективности судоходной компании

В.Ю. Каминский¹ e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, **Д.А. Скороходов**¹ e-mail: skorohodda@mail.ru,
М.Л. Маринов¹ e-mail: marinlomsy@gmail.com, **В.А. Аксенов**² e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук,

²Российский университет транспорта

Аннотация. Оценка экологической эффективности функционирования судоходной компании позволяет определить экологические аспекты воздействия компании на окружающую среду. Подобный анализ обеспечивает определение способов наилучшего управления экологическими аспектами. При планировании снижения экологической нагрузки необходимо осуществить выбор показателей для оценки экологической эффективности. Выполнено структурирование целей и подцелей управления безопасностью, выбран критерий экологической эффективности судоходной компании. Обоснована необходимость определения коэффициентов важности каждой цели. Для оценки экологической эффективности выбран критерий максимума аддитивной технической полезности. Разработана методика анкетирования судоходных компаний для определения значимости и достаточности сформулированных целей в рамках оценки экологической эффективности судоходной компании. Проведено анкетирование ведущих российских судоходных компаний по выявлению степени значимости и достаточности состава целей, подцелей и процедур, используемых для оценки экологической эффективности системы управления экологической безопасностью компании. Выбраны виды характеристик технической полезности для всех процедур, характеризующих эффективность мероприятий, и обоснована оценка экологической эффективности судоходной компании.

Ключевые слова: экологическая эффективность, система управления безопасностью, анкетирование, коэффициент важности, критерий, функция технической полезности, методика.

Evaluating the effectiveness of a shipping company environmental protection

Valery Yu. Kaminsky¹ e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru, **Dmitriy A. Skorokhodov**¹ e-mail: skorohodda@mail.ru,
Marin L. Marinov¹ e-mail: marinlomsy@gmail.com, **Vladimir A. Aksenov**² e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russian Federation,

²Russian university of transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

Abstract. The assessment of the environmental efficiency of the functioning of a shipping company allows us to determine the environmental aspects of the company's impact on the environment. Such an analysis provides a definition of how best to manage the environmental aspects. When planning to reduce the environmental burden, it is necessary to select indicators for assessing environmental efficiency. The structuring of the goals and sub-goals of safety management was carried out, the criterion of environmental efficiency of the shipping company was selected. The necessity of determining the importance coefficients of each goal is justified. To assess the environmental efficiency, the criterion of maximum additive technical utility is selected. The methodology of the survey of shipping companies was developed to determine the significance and sufficiency of the formulated goals in the framework of the assessment of the environmental efficiency of the shipping company. A survey of leading Russian shipping companies was conducted to identify the degree of significance and sufficiency of the goals, sub-goals and procedures used to assess the environmental effectiveness of the company's environmental safety management system. The types of technical utility characteristics for all procedures that characterize the effectiveness of measures are selected and the assessment of the environmental efficiency of the shipping company is justified.

Keywords: environmental efficiency, safety management system, questionnaire, importance factor, criterion, technical utility function, methodology

Введение

Безаварийная эксплуатации судна, как элемента мультимодальной транспортной системы, способствует повышению уровня защиты окружающей среды, поскольку авария или катастрофа судна приводят к тяжёлым экологическим последствиям [1-5]. В общем случае, оценка экологической эффективности (ОЭЭ) функционирования системы или объекта, позволяет идентифицировать и ранжировать экологические аспекты, т.е. элементы функционирования объекта, взаимодействующие с окружающей средой [6]. Подобный анализ позволяет сформулировать задачи по улучшению экологической эффективности процесса или объекта с целью определения способов наилучшего управления экологическими

асpekтами. ОЭЭ реализуется в рамках многостадийной модели управления: «планирование – выполнение – проверка - действие». На стадии «планирование» необходимо осуществить выбор показателей для ОЭЭ.

Оценку экологической эффективности судоходной компании (СК) начнём с систематизации требований, предъявляемых Международным кодексом по управлению безопасностью (МКУБ) [7] к системам управления безопасностью (СУБ) СК. Для успешного решения задачи ОЭЭ структурируем цели и подцели, задаваемые МКУБ, что позволит автоматизировать и сделать более эффективным процесс оценки экологической эффективности судоходной компании.

1. Структурирование целей и подцелей систем управления безопасностью

Выделим одиннадцать основных целей:

Ц₁ - разработка политики в области безопасности и защиты окружающей среды;

Ц₂ - обеспечение ответственности и полномочий компании;

Ц₃ - обеспечение наличия назначенного лица;

Ц₄ - обеспечение ответственности и полномочий капитана;

Ц₅ - обеспечение ресурсов и персонала;

Ц₆ - обеспечение разработки планов проведения судовых операций;

Ц₇ - обеспечение готовности к аварийным ситуациям;

Ц₈ - обеспечение получения сообщений о несоответствиях, несчастных случаях и опасных происшествиях, их расследование и анализ;

Ц₉ - обеспечение технического обслуживания и ремонта судна и его оборудования;

Ц₁₀ - обеспечение документацией;

Ц₁₁ - Обеспечение проверки, пересмотра и оценки СУБ;

Каждая цель состоит из подцелей, а именно: цель Ц₁ характеризуется семью подцелями (Ц_{1.1} ... Ц_{1.7}); цель Ц₂ - шестью подцелями; цель Ц₃ - десятью подцелями; цель Ц₄ - десятью подцелями; цель Ц₅ - двадцатью двумя подцелями; цель Ц₆ - пятнадцатью подцелями; цель Ц₇ - семнадцатью подцелями; цель Ц₈ - четырьмя подцелями; цель Ц₉ - четырнадцатью подцелями; цель Ц₁₀ - семнадцатью подцелями, цель Ц₁₁ - девятью подцелями.

Выполнение большей части подцелей оценивается совершением конкретных процедур (П), например, эффективность выполнения судовой компанией подцели ПЦ_{1.1} оценивается следующими процедурами:

П_{1.1.1} разработка инструкций и процедур для обеспечения безопасной эксплуатации судов и защиты окружающей среды согласно международному праву и законодательству государства Флага;

П_{1.1.2} разработка стратегии внедрения и поддержания политики;

П_{1.1.3} утверждение политики высшим руководством Компании;

П_{1.1.4} определение способности достижения целей МКУБ по обеспечению безопасной эксплуатации судна;

П_{1.1.5} подтверждение распространения данной стратегии на все подразделения Компании, задействованные в СУБ, и на суда.

Очевидно, что выделенные цели, подцели и процедуры различны по степени их значимости для оценки экологической эффективности СУБ судовой компании, следовательно, после структурирования аспектов необходимо задать коэффициенты важности каждой цели и подцели. Для чего проведено анкетирование ведущих российских судоводных компаний по оценке степени значимости и достаточности структурированных целей, подцелей и задач, используемых в оценке эффективности системы управления безопасностью судовой компании.

Для проведения опроса персонала компании разработаны анкеты, в которых экспертам

предлагается ранжировать цели и подцели СУБ СК методом попарного сравнения.

Коэффициенты важности позволяют определить «удельный вес» т.е. вклад каждой цели или подцели в суммарную эффективность процесса обеспечения безопасности. На основании информации, полученной из анкет судоводных компаний, рассчитаем коэффициенты по следующему алгоритму.

1. Для каждой квадратной матрицы параметров (цели и подцели) определяется сумма цифр, стоящих в каждой *i*-й строке, т.е. вычисляются значения

$$\sum_{j=1}^m C_j, \text{ где } j - \text{столбец.}$$

2. Складываются все цифры в столбце суммы строк,

$$\text{т.е. вычисляется значение } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}.$$

3. Коэффициент важности по каждой цели (подцели) определяется как отношение суммы цифр в каждой строке к сумме цифр столбца суммы строк, т.е.

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^m C_j / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m C_{ij}.$$

Например, для матрицы параметров

	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5
Ц1	1	2	0	1	2
Ц2	0	1	2	0	1
Ц3	2	0	1	0	2
Ц4	1	2	2	1	2
Ц5	0	1	0	0	1

имеем: для первой строки (*i*=1) $\sum_{j=1}^5 C_j = 6$; для

второй строки (*i*=2) $\sum_{j=1}^5 C_j = 4$; для третьей строки

(*i*=3) $\sum_{j=1}^5 C_j = 5$; для четвертой строки (*i*=4)

$\sum_{j=1}^5 C_j = 8$; для пятой строки (*i*=5) $\sum_{j=1}^5 C_j = 2$.

Тогда, для столбца сумм строк получим

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 C_{ij} = 25. \text{ Окончательно рассчитаем значения}$$

коэффициентов важности целей: $\lambda_1 = \frac{6}{25} = 0.24$;

$\lambda_2 = \frac{4}{25} = 0.16$; $\lambda_3 = \frac{5}{25} = 0.2$; $\lambda_4 = \frac{8}{25} = 0.32$;

$\lambda_5 = \frac{2}{25} = 0.08$.

Наиболее значимой является цель Ц₄, затем (в порядке убывания значимости) следуют цели Ц₁, Ц₃, Ц₂ и Ц₅. Общая эффективность процесса будет определяться выражением

$$P_{uc} = \sum_{i=1}^m \lambda_i * P_i,$$

где $m=5$ - количество целей, P_i - эффективность выполнения i -ой цели.

Следовательно, чем эффективнее достигнуты наиболее значимые цели (в данном примере C_4 и C_1), тем выше будет общая эффективность процесса, даже при невысоком проценте достижения остальных целей, и, наоборот, если менее значимые цели достигнуты на 100%, но при этом невысок процент реализации наиболее значимых целей, общая эффективность процесса будет невысокой.

В результате обработки анкетных данных получены значения коэффициентов важности целей и подцелей. Помимо этого, анализ результатов анкетирования показал, что все эксперты подтверждают достаточность представленных целей и подцелей СУБ СК и не видят необходимости внесения каких-либо добавлений или изменений в представленный перечень. Кроме того, 90% экспертов подтвердили полезность и целесообразность представленной структуры целей и подцелей СУБ для использования ее в методике оценки экологической эффективности СК.

2. Выбор критерия экологической эффективности судоходной компании

После определения коэффициентов важности перейдем к оценке эффективности СУБ СК. Учитывая разнородность целей и, соответственно, критериев их достижения как количественного, так и качественного характера, в качестве критерия эффективности необходимо выбрать показатель, который бы учитывал достижение всех видов целей и подцелей. Таким показателем является критерий максимума аддитивной технической полезности [8], который определяется на основе функций технической полезности, обеспечивающих количественное измерение рассматриваемых целей C_i и подцелей $ПЦ_i$.

Функция технической полезности $P(S)$ - вещественная функция, сохраняющая упорядочение при любых $S^1, S^2 \in S$ тогда и только тогда, когда $S^1 > S^2 \Leftrightarrow P(S^1) > P(S^2)$.

Очевидна потребность в увеличении технической полезности. Подобную оценку можно рассматривать как n -мерный критерий оптимизации.

Считая, что совокупность критериев ориентирована положительно, а любая пара критериев не зависит по предпочтению от других критериев, определим функцию технической полезности по набору целей в виде:

$$P_{uc}(S) = \sum_{i=1}^{11} \lambda_i P_i(S),$$

где λ_i - коэффициент важности цели P_i .

Нормированный аддитивный критерий существует, если функции $P_i(S)$ подобраны так, что $P \in [0,1]$ для всех S , а коэффициенты λ_i

удовлетворяют условию $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, 0; \lambda_i > 0$ для всех $i = 1, n$.

По теореме Фишберна [9] сформированная функция технической полезности существует тогда и только тогда, когда выполняется условие аддитивной независимости целей $C_1 \dots C_{11}$.

При этом:

- функция P_{uc} нормирована условием $P_{uc}(S) = \max$;
- частные функции технической полезности нормированы условиями $P_i(S_i^0) = 0; P_i(S_i^n) = 1$;
- $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Аддитивная форма технической полезности не только проста по структуре и удобна для проведения расчета, но и, кроме того, допускает единственную физическую интерпретацию, при которой отчетливо прослеживается вклад каждой цели в общую оценку предпочтительности. В этом случае критерий эффективности будет иметь вид $\arg \max P_{\sum} (S_i); i \in 1, n$, удовлетворяющий

условиям существования $S_{УУ}^1 > S_{УБ}^2 \Leftrightarrow P^1(S_i) > P^2(S_i)$ и непрерывности - дифференцируемости по рассматриваемым процедурам. Использование в качестве критерия эффективности максимума технической полезности позволяет осуществить нормирование разнородных целей и формировать процесс оценки эффективности в формализованном виде.

В нашем случае функция технической полезности СУБ будет иметь следующий вид:

$$P_{uc} = \sum_{i=1}^{11} \lambda_i P_i, \text{ причем}$$

$$P_1 = \sum_{j=1}^7 \lambda_{1j} P_{1j}; P_2 = \sum_{j=1}^6 \lambda_{2j} P_{2j}; P_3 = \sum_{j=1}^{10} \lambda_{3j} P_{3j};$$

$$P_4 = \sum_{j=1}^{10} \lambda_{4j} P_{4j}; P_5 = \sum_{j=1}^{22} \lambda_{5j} P_{5j}; P_6 = \sum_{j=1}^{15} \lambda_{6j} P_{6j};$$

$$P_7 = \sum_{j=1}^{17} \lambda_{7j} P_{7j}; P_8 = \sum_{j=1}^4 \lambda_{8j} P_{8j}; P_9 = \sum_{j=1}^{14} \lambda_{9j} P_{9j};$$

$$P_{10} = \sum_{j=1}^{17} \lambda_{10j} P_{10j}; P_{11} = \sum_{j=1}^9 \lambda_{11j} P_{11j};$$

где $P_i (i=1 \div 11)$ - эффективность выполнения i -ой цели; λ_i - коэффициент важности i -ой цели; P_{ij} - эффективность выполнения j -ой подцели; λ_{ij} - коэффициент важности j -ой подцели.

3. Вид характеристик технической полезности

Многие подцели характеризуются некоторым множеством процедур, которые, в свою очередь, могут быть ранжированы для оценки подцели и могут характеризоваться либо технической функцией

полезности табличного вида: высокоэффективное исполнение - $P_{ijk}=1$, эффективное исполнение - $P_{ijk}=0.8$, удовлетворительное (средне эффективное) исполнение - $P_{ijk}=0.63$, малоэффективное исполнение - $P_{ijk}=0.37$, не эффективное исполнение - $P_{ijk}=0$ (процедуры П1.1.1, П1.1.2, П1.2.1, П1.2.2, П1.3.1, П1.3.2, П1.4.1, П1.4.2, П1.5.1, П1.5.2, П1.6.1, П1.6.2, П1.7.1, П1.7.2,), либо технической функцией полезности релейного вида: неудовлетворительно (не выполнено) - $P_{ijk}=0$, удовлетворительно (выполнено) - $P_{ijk}=1$ (все остальные процедуры).

Для оценки эффективности подцелей, не связанных с выполнением определенного множества процедур, используется релейная функция полезности: неудовлетворительно (не выполнено) - $P_{ij}=0$, удовлетворительно (выполнено) - $P_{ij}=1$ (подцели ПЦ2.1, ПЦ2.3 ÷ ПЦ2.5, ПЦ3.1, ПЦ3.3 ÷ ПЦ3.10, ПЦ4.1 ÷ ПЦ4.3, ПЦ4.5, ПЦ4.7 ÷ ПЦ4.10, ПЦ5.1, ПЦ5.3, ПЦ5.9, ПЦ5.13 ÷ ПЦ5.15, ПЦ5.17 ÷ ПЦ5.22, ПЦ6.1, ПЦ6.2, ПЦ6.4, ПЦ6.6, ПЦ6.7, ПЦ6.13 ÷ ПЦ6.15, ПЦ7.9, ПЦ7.11 ÷ ПЦ7.14, ПЦ7.17, ПЦ9.6, ПЦ9.7, ПЦ9.14, ПЦ10.2 ÷ ПЦ10.17, ПЦ11.6 ÷ ПЦ11.9), или функция полезности табличного вида: высокоэффективное исполнение - $P_{ij}=1$, эффективное исполнение - $P_{ij}=0.8$, удовлетворительно (средне эффективное) исполнение - $P_{ij}=0.63$, малоэффективное исполнение - $P_{ij}=0.37$, не эффективное исполнение - $P_{ij}=0$ (подцели ПЦ7.2, ПЦ7.4, ПЦ8.2 ÷ ПЦ8.4, ПЦ9.5, ПЦ9.8 ÷ ПЦ9.10).

Для оценки эффективности всех остальных подцелей используется непрерывная функция желательности Харрингтона следующего вида:

$$P_{ij} = \exp(-\exp(-R)), R = \frac{8 * K_{вып.пр}}{I_{ij}} - 4,$$

где $K_{вып.пр}$ - число выполненных процедур, I_{ij} - общее число процедур в подцели ПЦ_{ij}.

Исключение составляют подцели ПЦ_{1j} цели Ц₁, эффективность выполнения которых определяется по формуле:

$$P_{1j} = 0.35 * (P_{1j1} + P_{1j2}) + 0.1 * \sum_{k=3}^5 P_{1jk}.$$

Подцели или процедуры, для оценки которых функция полезности применяется в форме непрерывной функции желательности Харрингтона или в форме функции табличного вида, будут определять качество систем управления безопасностью по величине максимальной аддитивной функции полезности. Данные подцели и процедуры определяют инициативу судоводных компаний по повышению эффективности системы управления безопасностью. Реализация этих и подобных подцелей и процедур обеспечивает широкие возможности для инициативных действий судоводных компаний по повышению эффективности СУБ, а также позволяет экспертам судить о целесообразности выбранных оценочных показателей.

4. Оценка экологической эффективности сухоходной компании

Вышеизложенный подход позволяет оценить эффективность выполнения одиннадцати так называемых целей-средств $P_{uc} = \sum_{i=1}^{11} \lambda_i P_i$, в

рамках процесса оценки эффективности СУБ СК.

Однако для интегральной оценки эффективности СУБ СК предлагается использовать составной критерий, который наиболее полно отражает эффективность результатов работы судоводной компании в области обеспечения безопасности. Данный критерий имеет следующий вид [10]:

$$P_{сум} = P_{uc} * P_{ур},$$

где $P_{сум}$ - суммарная эффективность СУБ СК;

P_{uc} - эффективность выполнения СК одиннадцати целей-средств, определяемая по вышеизложенной методике; $P_{ур}$ - эффективность выполнения СК целей-результатов, определяемая фактическим уровнем безаварийной работы СК на основании использования модифицированной (зеркальной) функции желательности Харрингтона следующего вида:

$$P_{ур} = \exp\left(-\exp\left(\frac{-6}{N_{ас}^{max}}(N_{ас}^{max} - K_{авар.})\right)\right),$$

где $N_{ас}^{max}$ - максимально-допустимое число аварий на одно судно в год; $K_{авар.}$ - коэффициент аварийности СК, рассчитываемый как среднее число аварий, приходящихся на одно судно в год:

$$K_{авар.} = \frac{N_{ас}^{\sum}}{N_{судос} * T},$$

где $N_{ас}^{\sum}$ - общее число аварий, произошедших на всех судах ($N_{судос}$) данной судоводной компании в течение рассматриваемого периода (T) лет.

График изменения эффективности достижения судоводной компанией целей-результатов ($P_{ур}$, %) в зависимости от значения коэффициента аварийности СК ($K_{авар.}$) при максимально-допустимом числе аварий одного судна в год $N_{ас}^{max} = 1$ приведён на рис. 1.

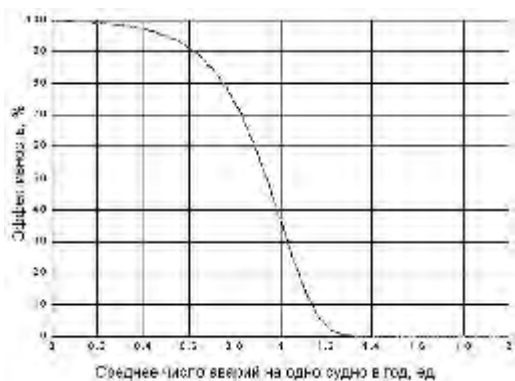


Рис 1. График изменения эффективности достижения СК целей-результатов в зависимости от изменения коэффициента аварийности СК при максимально допустимом числе аварий одного судна в год $N_{ав}^{max} = 1$

Таким образом, даже если эффективность достижения СК целей-средств ($P_{ис}$) будет достаточно высокой, но при этом количество аварий, происходящих на одно судно рассматриваемой СК в год, будет сопоставимо с максимально допустимым числом аварий, суммарная эффективность СУБ СК ($P_{сум}$) будет невысокой. С другой стороны, при достаточно низком уровне аварийности СК, т.е. при эффективном достижении судовой компанией целей-результатов, суммарная эффективность СУБ СК будет определяться эффективностью $P_{ис}$.

Заключение

1. Разработана структура целей судовой компании по достижению экологической безопасности, которая включает одиннадцать целей, каждая из которых состоит из подцелей, а те, в свою очередь, характеризуются конкретными процедурами.
2. Обоснована необходимость определения коэффициентов важности каждой цели и подцели, поскольку выделенные цели, подцели и процедуры различны по степени их значимости для оценки экологической эффективности СК.
3. Разработана методика анкетирования судовых компаний для определения значимости и достаточности сформулированных целей, подцелей и процедур в рамках оценки эффективности СК.
4. Проведено анкетирование ведущих российских судовых компаний по выявлению степени значимости и достаточности состава целей, подцелей и процедур, используемых для оценки эффективности системы управления безопасностью СК. Эксперты подтвердили целесообразность представленной структуры целей и подцелей для их использования в методике оценки экологической эффективности СК.
5. Выбраны виды характеристик технической полезности для всех процедур, характеризующих эффективность подцелей, и обоснована оценка экологической эффективности СК.
6. В качестве критерия эффективности выбран показатель, удовлетворяющий всем видам целей и подцелей - критерий максимума аддитивной технической полезности.

Литература

1. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Стариченков А.Л. Принципы оценки эффективности системы управления безопасностью судовой компании // Морской вестник. 2018. № 1 (65). С. 105-108.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Королёв О.А. Информационная система поддержки принятия решения при борьбе за живучесть судна // в сборнике: «Технологии построения когнитивных транспортных систем» материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 93-99.
3. Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы // Морские интеллектуальные технологии. 2020. №1-2(48). С.180-188.
4. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 185-194.
5. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Стариченков А.Л. Управление движением водоизмещающих судов на переходе морем // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-1 (45). С. 20-28.
6. ГОСТ Р ИСО 14031-2016. Экологический менеджмент. Оценка экологической эффективности. Руководство по оценке экологической эффективности: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. - Изд. официальное. - Москва: Стандартинформ, 2019. - 54 с.
7. Система освидетельствования компаний на соответствие требованиям Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ) НД/ND №2-0801101-002-R-E / Российский морской регистр судоходства. - Санкт-Петербург, 2005. - 317с.
8. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта / ред. Д. А. Скороходов. - Санкт-Петербург: ИПА ВУЗ, 2020. - 278 с.
9. Корчанов В.М., Скороходов Д.А. Интеллектуальные вопросы для решения в интегрированных системах управления судами // Морские интеллектуальные технологии. 2010. №5. С. 68-73.
10. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. – Санкт-Петербург: ЭЛМОР, 2002. -360 с.

References

1. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Starichenkov A.L. Principy ocenki ehffektivnosti sistemy upravleniya bezopasnostyu sudohodnoj kompanii [Principles for evaluating the effectiveness of a shipping company's safety management system] // Morskoj vestnik. 2018. №1 (65). pp. 105 – 108.
2. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Korolyov O.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri borbe za zhivuchest sudna [Information system to support decision-making in the fight for the survivability of the ship] // v sbornike: «Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem» materialy Vserossijskoj nauchno prakticheskoj konferencii. 2018. pp. 93 – 99.
3. Kozhevnikov D.F., Polyakov A.S., Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Ehkologicheskaya bezopasnost pri avariayah na morskoj sostavlyayushchej multimodalnoj truboprovodnoj sistemy [Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2020. №1-2 (48). pp. 180 – 188.
4. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost sistem upravleniya dvizheniem [Reliability of traffic control systems] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2018. №1-1 (39). pp. 185 - 194.
5. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem vodoizmeshchayushchih sudov na perekhode morem [Control of the movement of displacement vessels at sea crossing] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2019. №3-1 (45). pp. 20 – 28.
6. GOST R ISO 14031 2016 Ehkologicheskij menedzhment Ocenka ehkologicheskoy ehffektivnosti Rukovodstvo po ocenke ehkologicheskoy ehffektivnosti nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii [Environmental management. Environmental performance assessment. Guidelines for Environmental Performance Assessment: National Standard of the Russian Federation] data vvedeniya 2017-06-01 / Federalnoe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu. Izd oficialnoe. Moskva. Standartinform. 2019. 54 p.
7. Sistema osvidetelstvovaniya kompanij na sootvetstvie trebovaniyam Mezhdunarodnogo kodeksa po upravleniyu bezopasnostyu MKUB [The system of inspection of companies for compliance with the requirements of the International Code of Safety Management (ISM Code)] ND/ND №2-0801101-002-R-E / Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Sankt-Peterburg. 2005. 317p.
8. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Konstruktivnaya bezopasnost vysokoskorostnogo vodnogo transporta [Structural safety of high-speed water transport] / red. D.A. Skorohodov. Sankt-Peterburg. IPA VUZ. 2020. 278 p.
9. Korchanov V.M., Skorohodov D.A. Intellektualnye voprosy dlya resheniya v integrirovannyh sistemah upravleniya sudami [Intelligent issues to solve in integrated ship management systems] // Morskie intellektualnye tekhnologii. 2010. №5. pp. 68-73.
10. Lukomskij Yu.A., Peshekhonov V.G., Skorohodov D.A. Navigaciya i upravlenie dvizheniem sudov [Navigation and ship traffic management]. Sankt-Peterburg. EHMOR. 2002. 360 p.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Юрьевич Каминский, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; e-mail: skorohodda@mail.ru

Марин Любенов Маринов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Владимир Алексеевич Аксенов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», 125315, Москва, 3й Балтийский пер., д. 3, стр. 1, e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Valery Yu. Kaminsky, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr.Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: skorohodda@mail.ru

Marin L. Marinov, Ph.D. (Eng), leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

Vladimir A. Aksenov, professor, Dr.Sci. (Eng), head chair of «Technosphere security» the Russian university of transport (MIIT), p.1, 3rd Baltiyskiy per., Moscow, 125315, Russian Federation, e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Поступила в редакцию: 21.3.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

УДК 51-7:654.01

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.014>

Математическое моделирование характеристик качества обслуживания сообщений в информационно-телекоммуникационной сети водного транспорта

А.Ю. Иванов¹ e-mail: alexandr.y@mail.ru, В.И. Комашинский² e-mail: kama54@rambler.ru,
А.Н. Соколов³ e-mail: kama54@rambler.ru

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ³Научно-Технический Центр СевенТест

Аннотация. Внедрение интеллектуальных транспортных систем позволяет перейти на качественно новый уровень решения транспортно-логистических задач произвольного масштаба. Интеллектуализация основана на широком использовании информационно-телекоммуникационных сетей и систем, ориентированных на реализацию передовых и перспективных информационных технологий. В этом аспекте проявляется актуальность и важность построения коммуникационной среды, обеспечивающей передачу разнородного контента с требуемым уровнем качества. Материал статьи сосредоточен на разработке математического аппарата в рамках теории массового обслуживания с целью прогностического анализа характеристик качества обслуживания сообщений в информационно-телекоммуникационной сети водного транспорта. Осуществлена постановка задачи нахождения значений показателей качества обслуживания пакетов данных в сети. Обоснованы и получены основные математические соотношения. Оценена корректность разработанного математического инструментария. Показана возможность решения как прямых, так и обратных задач исследования информационно-телекоммуникационных систем в приведенной постановке. На этом основании сформулированы рекомендации по практическому применению результатов, полученных в статье.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, качество обслуживания, мультисервисный трафик, IP-пакеты, система массового обслуживания, время задержки заявок, функция распределения

Mathematical modeling of the characteristics of the quality of service of messages in the information and telecommunication network of water transport

Alexander Yu. Ivanov¹ e-mail: alexandr.y@mail.ru, Vladimir IL. Komashinskiy² e-mail: kama54@rambler.ru,
Andrei N. Sokolov³ e-mail: kama54@rambler.ru

¹State Marine Technical University, ²Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, ³SevenTest R&D, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The introduction of intelligent transport systems allows you to move to a qualitatively new level of solving transport and logistics problems of any scale. Intellectualization is based on the widespread use of information and telecommunication networks and systems focused on the implementation of advanced and promising information technologies. This aspect demonstrates the relevance and importance of building a communication environment that ensures the transfer of heterogeneous content with the required level of quality. The material of the article is focused on the development of a mathematical apparatus within the framework of the queuing theory for the purpose of predictive analysis of the characteristics of the quality of service of messages in the information and telecommunication network of water transport. The formulation of the problem of finding the values of quality indicators of service of data packets in the network is carried out. Basic mathematical relations are substantiated and obtained. The correctness of the developed mathematical tools is assessed. The possibility of solving both direct and inverse problems of researching information and telecommunication systems in the given formulation is shown. On this basis, recommendations were formulated for the practical application of the results obtained in the article.

Keywords: information and telecommunications network, quality of service, multiservice traffic, IP packets, queuing system, request delay time, distribution function

Введение

Переход к цифровой экономике подразумевает ускоренное проведение интеллектуализации транспортной сферы Российской Федерации. В рамках этого направления интенсивно решаются вопросы построения Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы (ИМТС). В состав системы включены моды авиационного, автомобильного, железнодорожного и водного транспорта [1,2]. Очевидна важность и актуальность проведения обширного комплекса организационно-технических мероприятий как по цифровизации и интеллектуализации каждой транспортной моды, так и по обеспечению их взаимного всестороннего

сопряжения. Тем не менее, масштаб водных транспортных систем в совокупности с постоянным повышением значений количественных и качественных показателей перевозок требуют сосредоточения внимания на разработке концептуальных, теоретических, методических положений и практических рекомендаций по формированию интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы водного транспорта (ИИТС ВТ). Фрагментарно такая система представлена в виде берегового и бортового компонентов, объединяемых с помощью средств связи и передачи данных, как показано на рисунке 1 [3].

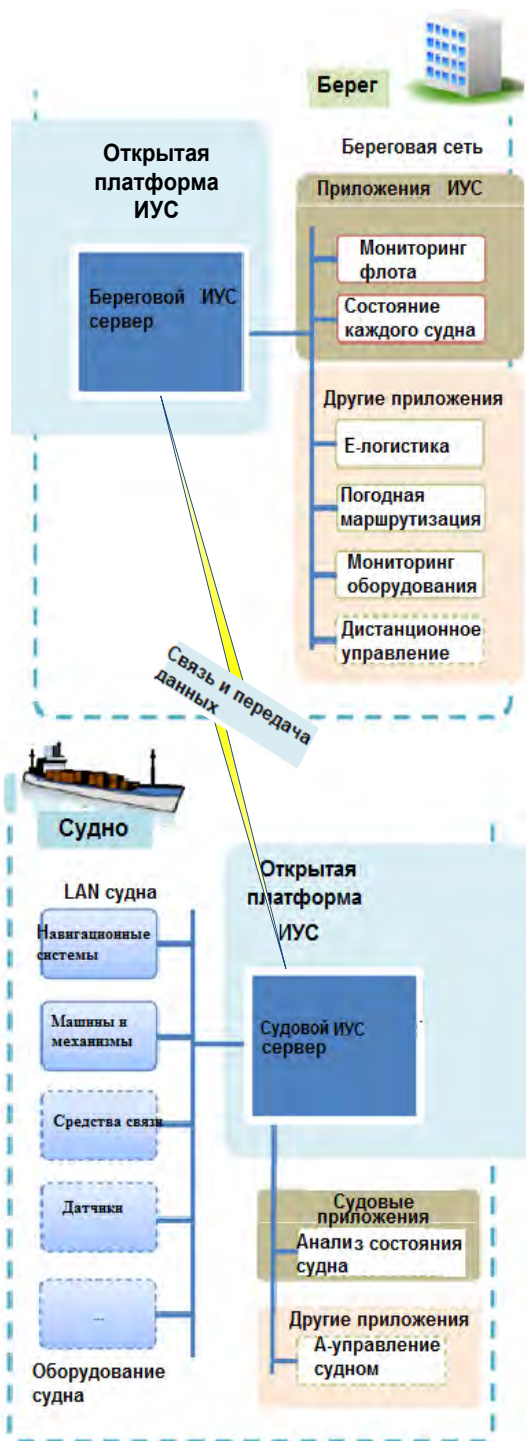


Рис. 1. Основные элементы перспективной информационно-телекоммуникационной системы «берег-корабль»

1. Предметная область исследования

Структуризация ИТС ВТ и анализ новых информационных технологий водного транспорта в период 4-й индустриальной революции [4] показывают особую значимость построения и организации функционирования эффективной коммуникационной среды. Такая среда может быть определена как информационно-телекоммуникационная сеть (ИТС). Ее компоненты (подсистемы) предполагается использовать в

организации цифровых водных магистралей, при интеллектуализации плавсредств и портов, а также при интеграции интеллектуальных мультимодальных транспортных систем. Традиционно подобные сети строятся как многоуровневые полифункциональные образования, включающие в свой состав магистральные сети и сети доступа, реализованные на базе проводных и беспроводных соединений, и использующие различные методы коммутации. В качестве примера представлен фрагмент информационно-телекоммуникационной сети водного транспорта, изображенный на рисунке 2 [4].

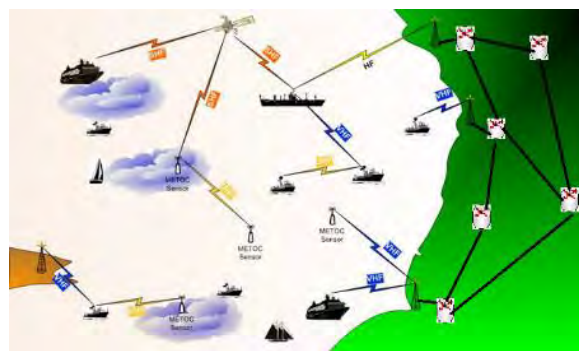


Рис. 2. Обобщенное представление фрагмента информационно-телекоммуникационной сети водного транспорта

Переход к цифровым информационно-телекоммуникационным сетям предполагает использование различных технологий передачи сообщений. В последнее время доминирующая роль принадлежит пакетной передаче. Такая технология обеспечивает возможность трансляции разнородного трафика и предоставление пользователям сервиса с требуемым уровнем качества (*Quality of Service – QoS*). Однако эта проблема не может быть признана имеющей однозначное и окончательное решение именно в силу нестабильности интенсивности и объемов потоков сообщений различного типа.

Поиск путей снятия остроты проблемы обеспечения *QoS* порождает двуединую задачу. Ее прямая постановка связана с анализом характеристик качества обслуживания потоков сообщений, передаваемых по сети. В обратной постановке целью является параметрический синтез технических средств передачи мультисервисного трафика с заданным уровнем *QoS*. Учитывая сложность поиска и реализации прямых методов синтеза, целесообразно свести этот процесс к итеративному решению задачи синтеза через анализ, известному как «итеративный синтез». Такое положение определяет первоочередное значение нахождения решения в первом из вариантов задачи. Базис решения подобных задач анализа составляют методы теории массового обслуживания и теории телетрафика.

2. Постановка задачи

Обмен информацией в форме IP-пакетов осуществляется через несколько устройств. Каждый IP-пакет может рассматриваться как заявка, поступающая на вход системы массового обслуживания (СМО). Показатели качества

обслуживания IP-пакетов в части их задержки принято задавать такой парой [5]:

- среднее значение задержки заявок между интерфейсами пользователь-сеть (терминальным оборудованием приема и передачи информации) – $t^{(1)}$;
- квантиль функции распределения (ФР) времени задержки заявок между интерфейсами пользователь-сеть – t_p .

На практике вместо квантиля ФР иногда используется значение среднеквадратического отклонения времени задержки заявок – σ .

3. Основные соотношения

В силу аддитивности математического ожидания [6] величина $t^{(1)}$ определяется как сумма средних значений времени задержки заявок в каждой СМО, входящей в маршрут обмена информацией между интерфейсами пользователь-сеть. Если количество таких СМО равно N , а среднее время задержки заявок в i -й СМО – $s^{(1)}(i)$, то искомая величина определяется так:

$$t^{(1)} = \sum_{i=1}^N s^{(1)}(i). \quad (1)$$

Формулы для оценки величин $s^{(1)}(i)$ приведены в научно-технической литературе по теории массового обслуживания [7-9]. Поэтому вычисление величины $t^{(1)}$ не представляет собой сложную задачу. Для некоторых моделей (в частности, при пуассоновском входящем потоке заявок) получены точные формулы для расчета величины $t^{(1)}$. Для потоков заявок других видов известны приближенные соотношения [7,10,11], позволяющие оценить величину $t^{(1)}$ с точностью, достаточной для решения практических задач.

Величина t_p обычно определяется численно путем решения уравнения, в которое входит ФР времени задержки заявок в N СМО – $S(t)$ и нормируемая вероятность p :

$$S(t_p) = p. \quad (2)$$

Вероятность p нормируется в [5] на уровне 0,999. Это означает, что значения $S(t)$ вычисляются на "хвосте" распределения. В этом случае могут быть успешно использованы приближенные формулы для рассматриваемой функции [12], основанные на разложении Хевисайда [13]. Преобразование Лапласа-Стилтьеса для ФР времени задержки заявок в i -й СМО, обозначаемое ниже как $\xi_i(s)$, может быть представлено в следующем виде [14]:

$$\xi_i(s) = \frac{z_i}{s + z_i} e^{-t_i s}. \quad (3)$$

Выражения для оценки величин z_i и t_i приведены, например, в [14]. Величина t_i определяет смещение оригинала от функции $\xi_i(s)$ вправо по оси абсцисс. Для качественного анализа исследуемой модели второй сомножитель в формуле (3) можно не учитывать, полагая, что $t_i = 0$.

Если времена задержки заявок во всех СМО на маршруте между интерфейсами пользователь-сеть являются взаимно независимыми случайными величинами, то для оценки ФР $S(t)$ можно использовать операцию свертки [13]. Это означает, что преобразование Лапласа-Стилтьеса для функции $S(t)$, которое обозначает далее как $\Psi(s)$, определяется таким произведением [13]:

$$\Psi(s) = \prod_{i=1}^N \xi_i(s). \quad (4)$$

Условия корректности формулы (4) будут сформулированы в следующем разделе статьи. В данном разделе уместно ввести предположение о видах СМО и привести приближенную формулу для оценки функции $S(t)$.

Обычно маршрут обмена IP пакетами включает два вида устройств – коммутации и обработки информации. Тогда величину N следует рассматривать как сумму $n_1 + n_2$. Иными словами, модель содержит два вида СМО. Нагрузки каждого вида СМО, как правило, близки друг к другу. Они обозначаются здесь как ρ_1 и ρ_2 . Тогда далее можно оперировать двумя значениями z_i : z_1 и z_2 . Введенные обозначения позволяют записать выражение для функции $\Psi(s)$ в виде такой свертки [13]:

$$\Psi(s) = \frac{z_1^{n_1} z_2^{n_2}}{(s + z_1)^{n_1} (s + z_2)^{n_2}}. \quad (5)$$

Оригинал – функция $S(t)$ – определяется по правилам, приведенным в [9]. Функция $S(t)$ может быть представлена в следующей редакции:

$$S(t) = 1 - \sum_{i=1}^2 e^{-z_i t} \sum_{j=1}^{n_i} k_{ij} t^{n_i-j}. \quad (6)$$

Для расчетов коэффициентов k_{ij} используется формула, полученная на основе правил поиска оригинала по преобразованию Лапласа-Стилтьеса [12]:

$$k_{ij} = \frac{(-1)^j \prod_{m=1}^2 (z_m)^{n_m}}{(n_i-j)!(n_{3-i}-1)!} \sum_{r=0}^{j-1} \frac{(n_{3-i}+r-1)! (-z_i)^{r-j}}{r!(z_{3-i}-z_i)^{n_{3-i}+r}}. \quad (7)$$

Для графического представления результатов, полученных для маршрута из N СМО, лучше использовать дополнительную функцию распределения времени задержки заявок – $V(t)$. Она рассчитывается по известной формуле: $V(t) = 1 - S(t)$. Такой подход обусловлен тем, что функция $S(t)$ при малых нагрузках быстро приближается к единице, что затрудняет визуальную оценку полученных результатов.

На рисунке 3 показаны пять функций $V(t)$, для которых меняется число СМО в составе маршрута: 7, 9, 11, 13 и 15 соответственно. При этом нагрузка для СМО каждого вида остается неизменной ($\rho_1 = 0,5$ и $\rho_2 = 0,4$). Величина интенсивности обслуживания для всех СМО – μ принята идентичной. При проведении расчетов предполагалось, что $n_1 = n_2 + 1$, то есть устройства коммутации и обработки информации чередуются.

Ось абсцисс представлена в виде сомножителя μt . Это позволяет выразить значения по оси абсцисс при помощи безразмерных единиц. Они показывают для фиксированного значения $V(t)$ во сколько раз задержка больше среднего времени обслуживания в одной СМО. Напомним, что среднее время обслуживания в одной СМО равно μ^{-1} . Для оси ординат на этом и следующем рисунках использован логарифмический масштаб. Из выражений (6) и (7) квантиль t_p находится численно. С этой целью может быть применен, например, метод "деления отрезка пополам" [15].

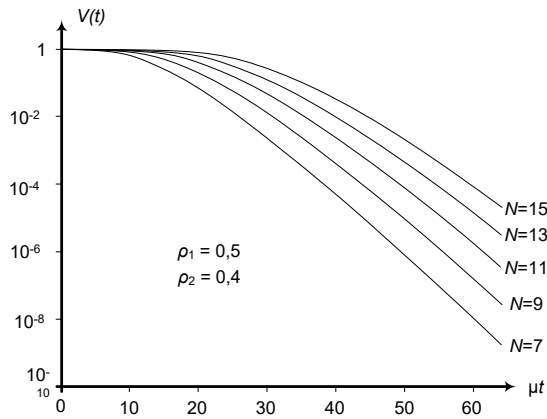


Рис. 3. Пять функций $V(t)$ для различного числа СМО в составе маршрута

На рисунке 4 приведены три функции $V(t)$. Для этих функций численность фаз обслуживания не меняется, то есть все заявки проходят через одиннадцать СМО. Изменяется нагрузка для СМО первого вида. Она принимает такие значения: 0,2, 0,5 и 0,8. Нагрузка ρ_2 остается неизменной. Ход кривых наглядно иллюстрирует рост задержки заявок по мере увеличения нагрузки СМО.

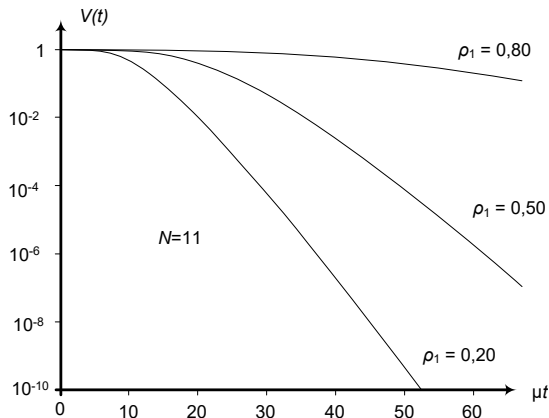


Рис. 4. Три функции $V(t)$ для различной нагрузки СМО первого вида

Функции $V(t)$, как было указано выше, получены при условии, что задержки заявок в каждой СМО представляют собой взаимно независимые случайные величины. Такая гипотеза верна только для тех маршрутов, в которых на вход каждой СМО поступает пуассоновский поток заявок, а длительность их обслуживания подчиняется экспоненциальному закону [16]. В большей части эксплуатируемых телекоммуникационных сетей и информационных систем подобные условия не выполняются. По этой причине необходимо оценить корректность соотношений, полученных для функции $S(t)$.

4. Оценка корректности полученных соотношений

Степень независимости процессов, которые протекают в СМО, обычно оценивается коэффициентом корреляции [6], но этот показатель не позволяет вычислить ошибки, возникающие вследствие принятия гипотезы об отсутствии

взаимной связи между элементами модели при расчете показателя t_p . По этой причине мера корректности полученных соотношений рассматривается как величина ошибки в расчете параметра t_p . Причем вместо ошибки в расчете показателя t_p можно оценивать погрешность вычисления среднеквадратического отклонения для времени задержки заявок σ . Такой подход представляется логичным, так как величина дисперсии σ^2 равна сумме значений дисперсии для времени задержки заявок во всех СМО, входящих в состав маршрута, только при взаимной независимости исследуемых величин. Более того, в [5] показана возможность установления простой связи между величинами t_p и σ .

В каждую из трех СМО в составе маршрута входят несколько потоков заявок. Этот факт иллюстрирует рисунок 5. Предлагаемая модель подразумевает возможность поступления L входящих потоков заявок на вход каждой СМО.

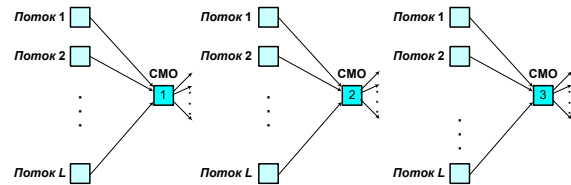


Рис. 5. Модель СМО с L входящими потоками заявок

Для исследования предложенной модели был использован метод имитационного моделирования. В таблице 1 приведены величины относительной ошибки в оценке σ для трех значений числа входящих потоков заявок. Нагрузка каждой СМО была выбрана равной 0,5. При таких условиях для пяти и более входящих потоков гипотеза о независимости процессов во всех СМО позволяет получить искомые оценки с весьма высокой точностью. На практике условие $L \geq 5$, как правило, соблюдается.

Табл. 1.

Результаты моделирования для разного числа входящих потоков заявок

Количество входящих потоков заявок	$L = 2$	$L = 5$	$L = 7$
Относительная ошибка в оценке величины σ	6,3%	0,86%	0,84%

Имитационное моделирование для разных видов входящих потоков заявок в диапазоне нагрузки СМО от 0,2 до 0,8 подтвердили полученный вывод о приемлемости гипотезы о взаимной независимости времени задержки заявок во всех СМО, входящих в состав маршрута. Это означает, что полученные соотношения для оценки величины t_p позволяют решать задачи по оценке характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика, представленного в виде совокупности IP-пакетов, с достаточной для практики точностью.

Следует подчеркнуть, что полученные соотношения для оценки величин $t^{(1)}$ и t_p позволяют решать не только прямые, но и обратные задачи [17]. Обратная задача заключается в оценке необходимой интенсивности обслуживания заявок в i -й СМО – μ_i при заданных ограничениях в виде установленных

норм на $t^{(1)}$ и t_p . При этом для каждого ограничения находится свое значение необходимой интенсивности обслуживания заявок – $\mu_i(t^{(1)})$ и $\mu_i(t_p)$. Очевидно, что в качестве величины μ_i должно быть выбрано максимальное значение из двух полученных оценок.

Заключение

Авторами статьи рассмотрено одно из направлений организации эффективного функционирования интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы водного транспорта. Сущность направления состоит в обеспечении требуемого уровня качества обслуживания сообщений одним из основных инфраструктурных элементов системы – информационно-телекоммуникационной сетью.

Актуальность проблемы обусловлена сложным структурным построением и полифункциональным характером сети, а также необходимостью обслуживания мультисервисного трафика с нестабильной интенсивностью и существенным объемом контента.

Осуществлена постановка задачи исследования, в которой определены целевые показатели качества обслуживания сообщений, такие как среднее значение задержки заявок и квантиль функции распределения времени задержки заявок.

В качестве базиса решения поставленной задачи использованы методы теории массового обслуживания и теории телетрафика.

Получены расчетные соотношения для определения значений искомых показателей. Корректность этих отношений проверена путем имитационного моделирования.

Вынесено суждение о том, что результаты исследования применимы для анализа характеристик качества обслуживания мультисервисного трафика, представленного в виде совокупности IP-пакетов. Эти соотношения позволяют также решать обратную задачу – определение параметров технических средств, которые способны обслуживать мультисервисный трафик при нормированных показателях качества обслуживания.

С практической точки зрения, полученные результаты могут быть использованы при проведении научно-исследовательских работ по построению коммуникационной среды ИИТС ВТ, смежных или аналогичных систем с целью обоснования требований к уровню качества предоставляемого сервиса. Также представляется перспективным применение разработанного математического аппарата на этапе выбора номенклатуры технических средств информационно-телекоммуникационной системы.

Литература

1. Комашинский В.И., Малыгин И.Г., Аванесов М.Ю., Асаул А.Н. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос, № 3, 2016. С. 8-16.
2. Иванов А.Ю., Комашинский В.И., Малыгин И.Г. Концепция построения единого информационного пространства интеллектуальной мультимодальной транспортной системы // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 6 (67). С. 24–28.
3. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Асаул М.А. Интеллектуальные технологии на водном транспорте // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 2 (36) Т.2. С. 54-58.
4. Аванесов М.Ю., Комашинский В.И., Михалев О.А., Малыгин И.Г., Королев О.А. Индустриальные революции и водный транспорт // Информация и космос. 2017. №3. С. 38-47.
5. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2011, 66 p.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: издательский центр "Академия", 2005, 576 с.
7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979, 432 с.
8. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015, 867 с.
9. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Однолинейные системы массового обслуживания. – Учебное пособие, СПбГУТ, 2010, 112 с.
10. Штойян Д. Качественные свойства и оценки стохастических моделей. – М.: Мир, 1979, 268 с.
11. Соколов А.Н. Методы анализа задержек IP-пакетов в сети следующего поколения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб: СПбГУТ, 2011, 20 с.
12. Васильченко А.И. Исследование задержек сообщений в общем канале сигнализации и определение их влияния на качество обслуживания абонентов ГТС. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: ЦНИИС, 1974, 21 с.
13. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971, 288 с.
14. Соколов Н.А. Задачи планирования сетей электросвязи. – СПб.: Техника связи, 2012, 432 с.
15. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – СПб: Лань, 2011, 664 с.
16. Burke P.J. The output of a queuing system. – Operation Research, №4, 1956, pp. 699–704.
17. Aster R.C., Borchers B., Thurber C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems. – Elsevier, 2018, 404 p.

References

1. Komashinskiy V.I., Malygin I.G., Avanesov M.Yu., Asaul A.N. Kontseptual'nyye podkhody k postroyeniyu intellektual'noy mul'timodal'noy transportnoy sistemy RF [Conceptual approaches to building an intelligent multimodal transport system of the Russian Federation] // Informatsiya i kosmos, № 3, 2016. pp. 8-16.
2. Ivanov A.Yu., Komashinskiy V.I., Malygin I.G. Kontseptsiya postroyeniya yedinogo informatsionnogo prostranstva intellektual'noy mul'timodal'noy transportnoy sistemy [The concept of building a unified information space of an intelligent multimodal transport system] // Transport Rossiyskoy Federatsii. 2016. № 6 (67). pp. 24–28.

3. Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Asaul M.A. Intellektual'nyye tekhnologii na vodnom transporte [Intelligent technologies in water transport] // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2017. № 2 (36) T.2. pp. 54-58.
4. Avanesov M.Yu., Komashinskiy V.I., Mikhalev O.A., Malygin I.G., Korolev O.A. Industrial'nyye revolyutsii i vodnyy transport [Industrial revolutions and water transport] // Informatsiya i kosmos. 2017. №3. pp. 38-47.
5. ITU-T. Network performance objectives for IP-based services. Recommendation Y.1541. – Geneva, 2011, 66 p.
6. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. – M.: izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2005, 576 p.
7. Kleynrok L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing Theory]. – M.: Mashinostroyeniye, 1979, 432 p.
8. Stepanov S.N. Teoriya telegrafiki: kontseptsii, modeli, prilozheniya [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2015, 867 p.
9. Sokolov A.N., Sokolov N.A. Odnolineynyye sistemy massovogo obsluzhivaniya [Single-line queuing systems]. – Uchebnoye posobiye, SPbGUT, 2010, 112 p.
10. Shtoyan D. Kachestvennyye svoystva i otsenki stokhasticheskikh modeley [Qualitative properties and estimates of stochastic models]. – M.: Mir, 1979, 268 p.
11. Sokolov A.N. Metody analiza zaderzhek IP-paketov v seti sleduyushchego pokoleniya [Methods for analyzing the delays of IP packets in the next generation network]. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – SPb: SPbGUT, 2011, 20 p.
12. Vasil'chenko A.I. Issledovaniye zaderzhek soobshcheniy v obshchem kanale signalizatsii i opredeleniye ikh vliyaniya na kachestvo obsluzhivaniya abonentov GTS [Investigation of message delays in the common signaling channel and determination of their impact on the quality of service for GTS subscribers]. – Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – M.: TSNIIS, 1974, 21 p.
13. Dech G. Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasi i Z-preobrazovaniya [Guide to the practical application of the Laplace transform and Z-transform]. – M.: Nauka, 1971, 288 p.
14. Sokolov N.A. Zadachi planirovaniya setey elektrosvyazi [Tasks of planning telecommunication networks]. – SPb.: Tekhnika svyazi, 2012, 432 p.
15. Demidovich B.P., Maron I.A. Osnovy vychislitel'noy matematiki [Fundamentals of Computational Mathematics]. – SPb: Lan', 2011, 664 p.
16. Burke P.J. The output of a queuing system. – Operation Research, №4, 1956, pp. 699–704.
17. Aster R.C., Borchers B., Thurber C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems. – Elsevier, 2018, 404 p.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Юрьевич Иванов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3; e-mail: alexandr.y@mail.ru

Владимир Ильич Комашинский, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13; e-mail: kama54@rambler.ru

Андрей Николаевич Соколов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-Технического Центра Севентест, 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Красного Курсанта, д. 25, лит. Ж; e-mail: asokolov@seventest.ru

Alexander Yu. Ivanov, professor, Dr.Sci. (Eng), professor of the Department of Automatic Control Systems and On-Board Computer Engineering, St. Petersburg State Marine Technical University, st. Lotsmanskaya St., 3, Petersburg, 190121, Russian Federation; e-mail: alexandr.y@mail.ru

Vladimir IL. Komashinskiy, associate professor, Dr.Sci. (Eng), Deputy Director for Science, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail: kama54@rambler.ru

Andrei N. Sokolov, Ph.D. (Eng), Senior Researcher in SevenTest R&D Ltd, 25 Zh, Krasnogo Kursanta, St. Petersburg, 197198, Russian Federation; e-mail: asokolov@seventest.ru

Поступила в редакцию: 02.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

Видеосистема наблюдения за морскими судами в реальном времени

Ш.С. Фахми^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, С.А. Селиверстов¹ e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru,
Е.В. Костикова³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Р.Р. Муксимова⁴ e-mail: rose.r.mux@gmail.com,
В.О. Титов⁵ e-mail: v.o.titov@spbu.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, ⁴Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, ⁵Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация. Анализируется процесс развития систем наблюдения. Раскрываются особенности технологических изменений систем наблюдения 1-го, 2-го и 3-го поколений. Декларируется, что современные полупроводниковые технологии позволяют перейти к более развитым системам видеонаблюдения 3-го поколения, где преобразование и обработка видеoinформации выполняются непосредственно в видеодатчиках на этапе формирования кадров. Умные камеры расширяют функциональность видеосенсора 3-го поколения, обеспечивая бортовую высокоуровневую обработку видео. Рассмотрены эволюция систем наблюдения и архитектура обработки видеoinформации с использованием интеллектуальных видеокамер с высоким динамическим диапазоном. Представлена графическая интерпретация, иллюстрирующая процесс эволюции систем видеонаблюдения от 1-го к 3-му поколению. Проанализированы функции современных систем видеонаблюдения и переход от высокоуровневой обработки видео из систем общего назначения во встраиваемые системы. Рассмотрен состав видеосистемы наблюдения с использованием интеллектуальной видеокамеры, включающий видеодатчик, блок обработки и блок управления связи. Описаны условия в которых морские системы видеонаблюдения используются. Приведены результаты экспериментальных исследований и выполнены оценки производительности. Показаны достигнутые результаты производительности для различных реализаций алгоритма обнаружения морских судов и необходимое время выполнения при обработке одного изображения с полным разрешением на стандартном настольном компьютере Pentium 4 с частотой 2,4 ГГц. с использованием реконфигурируемой системой на кристалле.

Ключевые слова: видеосистема наблюдения, интеллектуальная видеокамера, морские суда, архитектура видеосистемы, алгоритмы, обнаружение и распознавание.

Real-time marine vessel surveillance video system

Shakeeb S. Fahmi^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, Svyatoslav A. Seliverstov¹ e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru,
Elena V. Kostikova³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru, Roza R. Muksimova⁴ e-mail: rose.r.mux@gmail.com,
Viktor O. Titov⁵ e-mail: v.o.titov@spbu.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russian Federation, ⁴St. Petersburg State University of Civil Aviation, Russian Federation, ⁵St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The process of development of observation systems is analyzed. The features of technological changes in observation systems of the 1st, 2nd and 3rd generations are revealed. It is declared that modern semiconductor technologies make it possible to move to more advanced third-generation video surveillance systems, where the conversion and processing of video information is performed directly in video sensors at the stage of framing. Smart cameras extend the functionality of the 3rd generation image sensor to provide on-board high-level video processing. The evolution of surveillance systems and architecture of video information processing using smart cameras with a high dynamic range are considered. A graphical interpretation is presented that illustrates the evolution of video surveillance systems from the 1st to the 3rd generation. The functions of modern video surveillance systems and the transition from high-level video processing from general-purpose systems to embedded systems are analyzed. The composition of a video surveillance system using an intelligent camera is considered, including a video sensor, a processing unit and a communication control unit. The conditions in which marine video surveillance systems are used are described. The results of experimental studies are presented and performance estimates are performed. Shown are the achieved performance results for various implementations of the ship detection algorithm and the required execution time when processing one full resolution image on a standard Pentium 4 desktop computer running at 2.4 GHz. using a reconfigurable system on a chip.

Keywords: video surveillance system, smart video camera, marine vessels, video system architecture, algorithms, detection and recognition.

Введение

Морские системы видеонаблюдения в настоящее время претерпевают бурные инновационные изменения. Традиционные системы наблюдения 1-го и 2-го поколений использовали в основном аналоговые камеры видеонаблюдения для захвата видеoinформации прибрежных вод, береговых полос водных объектов и акваторий, затем

захваченные визуальные данные передавались в цифровые внутренние системы, где происходили некоторые вычисления или хранение.

Современные полупроводниковые технологии позволяют перейти к более развитым системам видеонаблюдения 3-го поколения, где преобразование и обработка видеoinформации

выполняются непосредственно в видеодатчиках на этапе формирования кадров (рис. 1) [1].

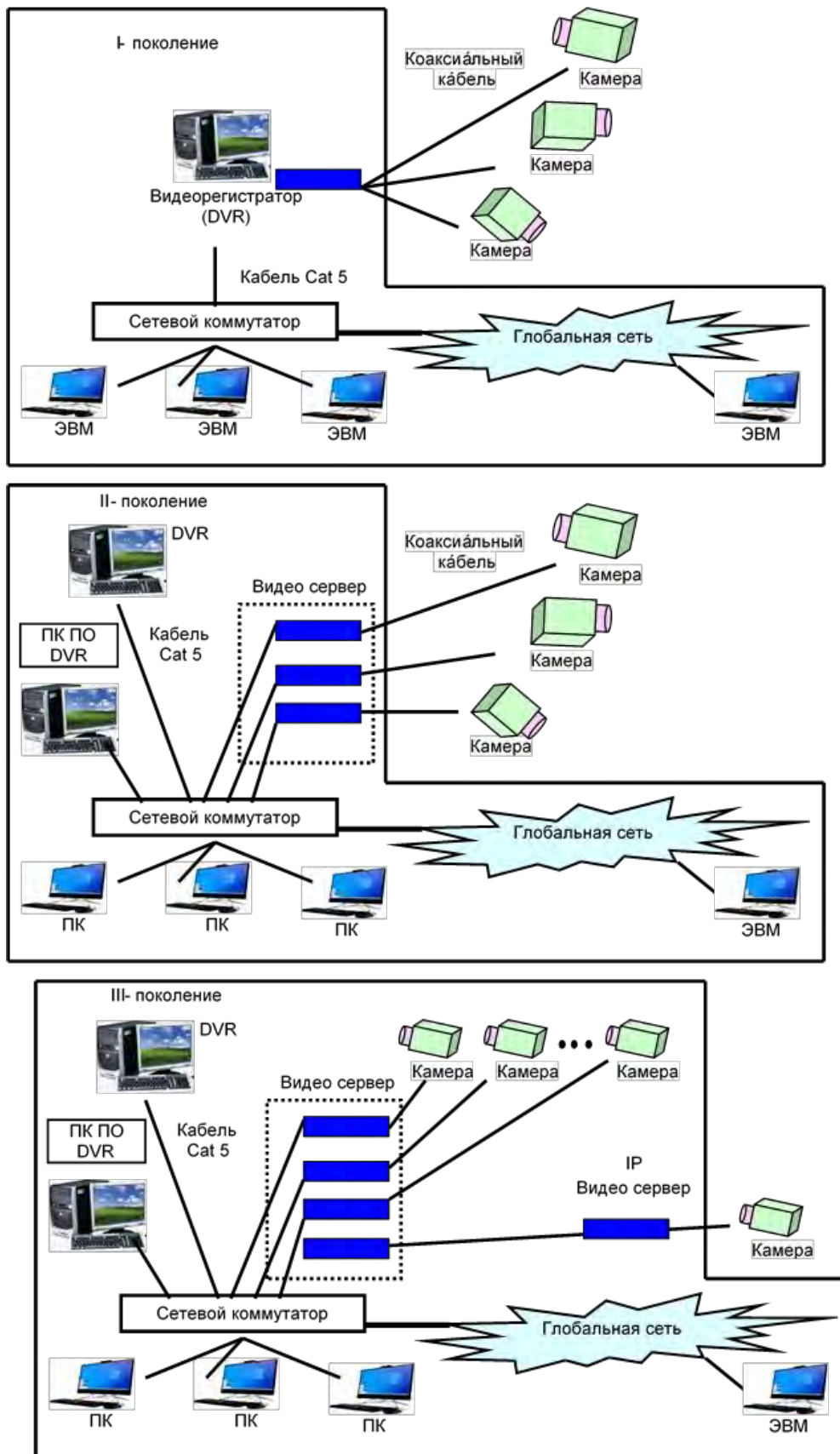


Рис. 1. Эволюция систем видеонаблюдения от 1-го к 3-му поколению.

Умные камеры [2] даже расширяют функциональность видеосенсора 3-го поколения, обеспечивая бортовую высокоуровневую обработку видео.

Таким образом, новые системы наблюдения переходят от аналоговых к цифровым распределенным, децентрализованным системам, которые обладают расширенной функциональностью, улучшенной устойчивостью к ошибкам. Очевидно, что наблюдение за береговой линией, особенно в условиях высокой интенсивности движения значительно выигрывает от этой эволюции. Например, вычисление признаков и параметров морских судов на месте и в режиме «Онлайн», таких как формы, габариты и скорость движения или места положения и т.д., улучшит возможности систем управления движением морских судов; автоматическое обнаружение опасных ситуаций, столкновений или отслеживание судов и т.д., что значительно повышает безопасность работы портов. Однако системы наблюдения 3-го поколения (рис. 1) имеют дополнительные ограничения (при работе в режиме реального времени) для компонентов системы наблюдения. В частности, интеллектуальная камера должна выполнять свои высокоуровневые задачи в жестких временных ограничениях и с ограниченными ресурсами процессора, памяти и мощности.

1. Функции интеллектуальной камеры в системе видеонаблюдения

В данной статье рассматривается прототип умной видеокamеры при наблюдении за морскими судами. Интеллектуальная камера должна выполнить следующее функции:

I) захват видеопотока с помощью сложного КМОП-датчика изображения [3];

II) выполнение высокоуровневого анализа видео, например, местоположения судна и среднюю скорость;

III) сжатие видеопотока с помощью известных алгоритмов спектрального преобразования [4,5];

IV) передача сжатых данных через IP-сеть на базовую станцию.

Таким образом, интеллектуальная видеокamera является ключевым компонентом новых морских систем видеонаблюдения.

В Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН) введутся исследования по разработке интеллектуальных видеосистем, снабженных умными камерами для наблюдения, и анализа видеoinформации и передачи её в реальном времени. При этом основными результатами указанных исследований должны включать:

I) реализацию в реальном времени индивидуальных высокоуровневых систем на кристалле на встроенных платформах;

II) разработку гибкой и масштабируемой архитектуры smart-камер;

III) демонстрацию в реальном времени автоматического обнаружения и отслеживание всех морских судов с помощью smart-камеры.

Важно, переход высокоуровневой обработки видео из систем общего назначения во встраиваемые системы также требует развитие и внедрение различных методов анализа и

соответствующего программного обеспечения. Встроенные платформы обеспечивают достаточную вычислительную производительность, при этом перенос необходимого и эффективного программного обеспечения для таких платформ является сложной и утомительной задачей.

Высокоуровневые алгоритмы обработки видеoinформации могут быть в основном прототипированы и разработаны на компьютерах общего назначения с использованием таких языков, как Matlab или C++. Однако прямое сопоставление этих алгоритмов со встроенной платформой в большинстве случаев не дает требуемой производительности, поскольку компилятор и инструменты генерации кода не способны использовать аппаратные доступные инструменты встроенной платформы [6].

Использование оптимизированных библиотек изображений для встраиваемой платформы значительно повышает производительность. Однако из-за сложности алгоритмов высокого уровня требуемая производительность может быть даже не достигнута при использовании только библиотек (низкого уровня) изображений [7]. Причиной является наличие типичных преград при переносе программного обеспечения с настольных платформ на встроенные архитектуры с использованием цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), например, чрезмерный доступ к памяти, неэффективная обработка данных и форматы данных [8].

Решением указанных проблем является видеосистема наблюдения на основе реконфигурируемых программируемых схем, которые характеризуются встроенными алгоритмами автоматического обнаружения морских судов и реализованы в самом вычислителе на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

2. Архитектура видеосистемы наблюдения за морскими судами

Помимо функциональных требований, морское наблюдение добавляет экологические требования к интеллектуальным камерам. Поскольку умные камеры установлены в портах, вдоль береговых линий и на других специальных местах подвергаются суровым воздействиям окружающей среды, таким как быстрые изменения температуры и влажности (ветер, туман, дождь и т.п.). А также, необходимо учесть диссипацию мощности видеосистемы по двум причинам:

I) высокая рассеиваемая мощность обычно приводит к чрезмерному отходящему теплу, которое требует активного охлаждения для рассеивания. Поскольку движущиеся части подвержены износу, а быстрое охлаждение нежелательно;

II) из-за ограниченных энергетических ресурсов в открытых местах, где видеосистема может питаться от солнечной панели, необходимо максимально снизить энергопотребление [9].

Состав видеосистемы наблюдения

Как показано на Рис. 2, интеллектуальная камера разделена на три основные части:

- 1) видеодатчик;
- 2) блок обработки;
- 3) блок управления связи.

1. Видеодатчик. Видеодатчик представляет собой устройство формирования видеоинформации, входящее в состав интеллектуальной камеры. Датчик накапливает фотоны от поступающего света и преобразует их в электрические сигналы (далее двоичные биты), которые в последствии будут передаваться в блок обработки. КМОП-фотоприемник представляет собой устройство синтеза изображений и по своим характеристикам соответствует требованиям, предъявляемым к фотоприемникам из-за высокого динамического диапазона, благодаря своим логарифмическим характеристикам и наличию в составе встроенные АЦП и усилители (табл. 1).

Таблица 1.

Характеристики фотоприемника

Название характеристик	значения
Динамический диапазон	100 dB
Тип	Ч/б и цветное
Разрешение	640×480 – 1024×1024
Частота кадров	25-30
ADC- разрядность	12 – 19 bit
Управление датчиками	I2C

2. Блок обработки. Вторым наиболее важным элементом в составе морской видеосистемы наблюдения является блок обработки.

Из-за высокой производительности и параллельной обработки изображений и видео требования к производительности вычислений очень высоки. При этом необходимо обеспечить уровень вычислительной производительности не менее 10 GIPS. Эти требования к производительности вместе с различными ограничениями к встроенным системным компонентам выполняются с помощью

цифрового сигнального процессора (ЦСП). Умная камера оснащена двумя ЦСП, работающими на частоте 600 МГц. Оба ЦСП слабо связаны через шину PCI, в то время как каждый процессор подключен к своей собственной локальной памяти. Различные задачи статически сопоставляются с ЦСП, чтобы избежать накладных расходов, вызванных глобальным планировщиком.

Видеодатчик подключен к процессору ЦСП через память FIFO, чтобы ослабить синхронизацию между датчиком и ЦСП. Затем изображение передается во внешнюю память ЦСП и по шине PCI к другим компонентам (ЦСП и сетевому процессору).

3. СФ-блок управления и связи. Интерфейсным устройством для связи видеосистемы наблюдения с внешней средой является СФ-блок управления и связи. Устройство в основном состоит из процессора, который непосредственно управляет большинством вычислительных функций и коммуникаций, таких как PCI, Ethernet, USB включая и последовательную связь. Беспроводная локальная сеть и GSM/GPRS подключаются с помощью общего интерфейса. Этот интерфейс позволяет подключать различные периферийные устройства или системы связи с минимальными усилиями.

Второй класс интерфейсов также управляется этим СФ-блоком управления и связи. В том числе управление движущимся частью (PTZ- pan-tilt-zoom heads) — камера, которая поддерживает удалённое управление направлением и увеличением. Управление осуществляется с помощью последовательных интерфейсов, таких как RS232 и RS422. Также предусмотрены дополнительные входы/выходы, например, для запуска вспышек или моментальных снимков.

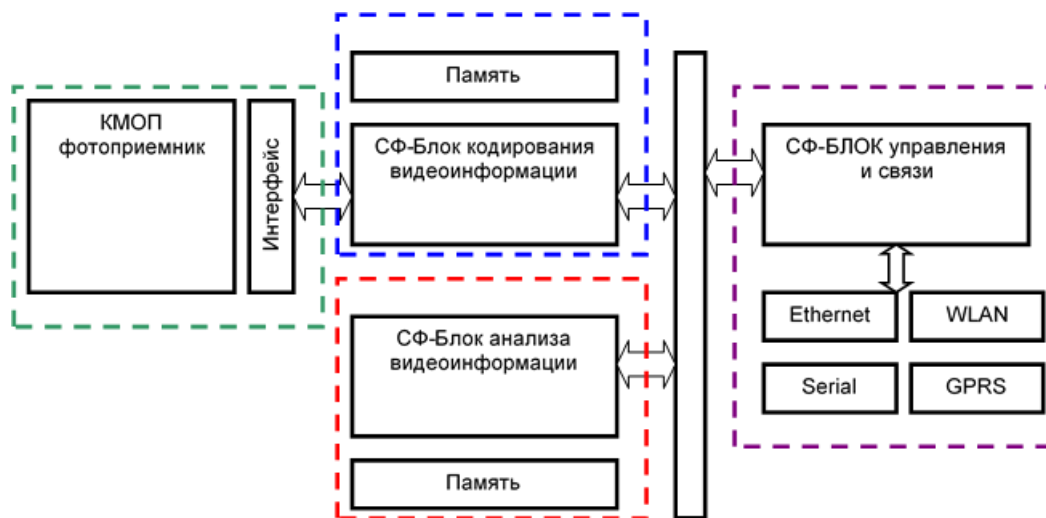


Рис. 2. Структурная схема видеосистемы наблюдения

3. Программное обеспечение

Программная архитектура видеосистемы с встроенной камерой в основном делится на две части:

1) ЦСП. Процессоры сконфигурированы в основном для выполнения интенсивных вычислительных задач, таких как сжатие видео (ДКП-3D [4]), анализ изображений (выделение опорных

точек объектов на изображениях [10]) или расчет параметров трафика. Процессоры работают на базе эталонной платформы в сочетании со стандартными алгоритмами [6], которые позволяют обмениваться и реконфигурировать алгоритмы во время выполнения [10]. Все действия по реконфигурации и управлению выполняются процессором управления системой.

2) Специализированный процессор для управления системой и связью. Стандартная

операционная система облегчает разработку внутренних и внешних коммуникационных сервисов, таких как web-сервисы, программируемые управляющие соединения или PCI-коммуникации.

Наиболее подходящим вариантом операционной системы для использования видеосистемы наблюдения за морскими судами является Linux.

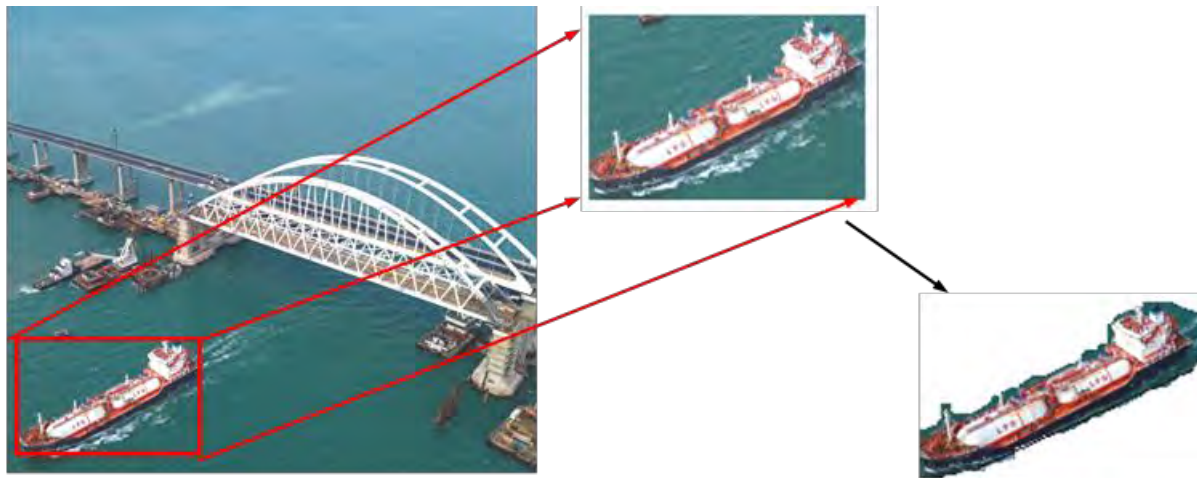


Рис. 3. Пример работы алгоритма обнаружения и слежения

4. Обнаружение морских судов

В ИПТ РАН проведены исследования и выполнено программное тестирование алгоритмов анализа изображений высокого уровня во встроенную архитектуру видеосистемы на конкретном алгоритме обнаружения и распознавания различных объектов на изображениях, например, обнаружение транспортных средств на магистралях с интенсивным движением [9]. А также проводится исследования по обнаружению и отслеживанию морских судов для различных классов морских сюжетов (рис. 3).

В качестве входных данных используются кадры изображения в 8-битном разрешении; алгоритм выдает на выход области изображения, в которых было обнаружено морское судно. Основная идея алгоритма заключается в поддержании фоновой модели наблюдаемой сцены, то есть в выявлении областей, где интенсивность в последнее время существенно не изменилась. Пиксели, не включенные в фоновую модель, представляют передний план, например движущиеся морские суда на наблюдаемой сцене. Таким образом, морской объект может быть обнаружен, когда достаточно большая площадь переднего плана становится (неподвижным) фоном.

На рис. 3 показаны пример работы алгоритма обнаружения судна.

Эти шаги повторяются всякий раз, когда захватывается новый кадр. К наименее недавно захваченных кадров изображения I_i размера $n \times m$ хранятся в буфере кадров.

Этапы обнаружения морских судов:

На первом этапе вычисляется статистика интенсивности пикселя и сохраняется в матрице распределения наблюдений ($M_{об}$) размером $n \times m$. Каждый элемент матрицы $M_{об}$ содержит среднее значение $X_{обср}$ и стандартное отклонение $\sigma_{об}$ распределения интенсивности пикселя за последние k кадров.

На втором этапе значения $M_{об}$ -OD используются для адаптации значений фоновой модели ($M_{ф}$), которые хранятся в матрице $M_{ф}$. $M_{ф}$ представляет долгосрочное распределение интенсивности каждого пикселя. Каждый элемент матрицы $M_{ф}$ также содержит среднее значение $X_{фср}$ и стандартное отклонение $\sigma_{ф}$. Заметим, что чем меньше значение $\sigma_{ф}$, тем больше у нас уверенности в том, что соответствующий пиксель принадлежит фону сцены изображения. Таким образом, стандартное отклонение $M_{об}$ и $M_{ф}$ используются для управления скоростью адаптации $M_{ф}$. Параметры фоновой модели адаптируются в соответствии со следующими уравнениями:

$$X_{фср} = (1-f) \cdot X_{фср} + f \cdot X_{обср}$$

$$\sigma_{ф} = (1-f) \cdot \sigma_{ф} + f \cdot X_{обср}$$

Новое значение фактора f вычисляется по формуле:

$$f = \frac{\alpha}{1 + e^{\alpha(\sigma_{об} - \sigma_{ф})}},$$

где α определяет верхний предел f (обычно 0 или 1), а α (обычно 1 или 0) - масштабирующий коэффициент. Матрица $M_{ф}$ инициализируется большими значениями для $\sigma_{ф}$. Таким образом, ни один пиксель не связан с фоном во время инициализации.

На третьем этапе алгоритм определяет изменения интенсивности между распределением $M_{ф}$ и $M_{об}$. Если распределения, представленные соответствующими элементами в $M_{ф}$ и $M_{об}$ - матрицах, существенно различаются, то выявляются новые фоновые области (пиксели). Результат этого статистического теста хранится в двоичном изображении размером $n \times m$.

На заключительном этапе алгоритм ищет связанные компоненты в двоичном изображении. Если подключенный компонент превышает заданную площадь, то идентифицируются морские судна.

Необходимо отметить, что все, кроме заключительного этапа, могут быть выполнены для

каждого пикселя независимо. Эта независимость от данных используется в отображении архитектуры ЦСП.

5. Экспериментальные результаты

5.1. Оценка производительности

В таблице 2 обобщены достигнутые результаты производительности для различных реализаций алгоритма обнаружения морских судов. В данной таблице показаны циклы и необходимое время выполнения для обработки одного изображения с полным разрешением, а также достигнутая кадровая частота.

Таблица 2.

Время выполнения и частота кадров различных вариантов алгоритма обнаружения

Вариант алгоритма	Используемый инструмент	Циклы	Время	Кадровая частота (fps)
1	Matlab		2900 ms	0,34
2	C++	4200 М	7000 ms	0,15
3-1	C++ без ПДП	380 М	634 ms	1,56
3-2	C++ с ПДП	305 М	509 ms	1,89
3-3	C++ с ПДП и упакованные данные	269 М	418 ms	2,54

Первый эксперимент представлял собой алгоритм, реализованный на языке Matlab. Этот алгоритм потребовал 2,9 сек для обработки одного изображения с полным разрешением на стандартном настольном компьютере Pentium 4 с частотой 2,4 ГГц. На плате с встроенной реконфигурируемой системой ПЛИС были реализованы три алгоритма обнаружения для оценки выше описанного метода обнаружения.

5.2. Оценка объема памяти

В таблице 3 приведены требования к памяти нашего алгоритма SVD, разделенные на внутреннюю и внешнюю память.

Объем кода и стек имеют небольшой размер. Большая часть внутренней памяти данных требуется

для буферов типа "FIFO" для передачи в режиме прямого доступа к памяти (ПДП).

В нашей реализации размер блока для передачи при ПДП может быть настроен.

Таблица 3.

Требования к памяти алгоритма обнаружения

Внутренний			Внешний
Код	Стек	Данные	Данные
7 Кб	1,8 Кб	430 Кб	19 Мб

Если в качестве размера буфера выбрано 8 полных строк изображения, то для буферов "FIFO" требуется 330 Кб. В общей сложности 17 Мб внешней памяти используется для хранения буфера кадров и различных временных матриц, используемых для вычислений. Буфер кадров использует 8 Мб для хранения 20 кадров.

Заключение

В данной работе были исследованы и разработаны алгоритмы и устройства видеосистем обнаружения морских судов, снабженных интеллектуальными камерами и, предназначенных для использования в системе видеонаблюдения за морскими судами в различных условиях шума и помех.

Для реализации видеосистемы наблюдения за морскими судами с необходимыми требованиями в реальном времени, необходимо обеспечить реализацию и совместимость всех компонентов с использованием высокоуровневых алгоритмов анализа изображений на базе современных платформ высокопроизводительных цифровых сигнальных процессоров. Такая стратегия необходима, применить при реализации алгоритмов обнаружения морских судов на встроенной процессорной платформе.

Применение разработанной системы также допустимо при совершенствовании процессов интеллектуализации элементов и систем транспортного комплекса [11, 12].

Литература

1. M. Bramberger, R. P. Pflugfelder, A. Maier, B. Rinner, B. Strobl, and H. Schwabach. A smart camera for traffic surveillance. In Proceedings of the First Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pages 153–164, 2003.
2. W. Wolf, B. Ozer, and T. Lv. Smart cameras as embedded systems. IEEE Computer, 35(9):48–53, September 2002.
3. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С. Видеосистемы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеoinформации// Датчики и системы. 2011. № 4. С. 58-61.
4. Костикова Е.В., Фахми Ш.С., Хасан Я.А.А., Селиверстов С.А., Соболев А.В., Подопрigора Н.В. Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения// Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 1. № 2 (48). С. 142-151.
5. Фахми Ш.С., Крылов Ю.Е., Хасан Я.А.А., Костикова Е.В. Кодек для передачи морских сюжетов в условиях ограничений канала// Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 164-171.
6. Фахми Ш.С., Бобровский А.И., Соколов Ю.М. Синтез устройств пирамидально-рекурсивного кодирования изображений на сигнальных процессорах// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 1. С. 78-89.
7. Березин В.В., Фахми Ш.С., Бобровский А.И., Черногоров В.С. Производительность многоядерных систем на кристалле фирмы intel-fpga для обработки видеoinформации// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 81-88.
8. Фахми Ш.С., Еид М.М., Костикова Е.В., Мукало Ю.И., Крюкова М.С., Зайдулин С.М. Классификация транспортных средств в реальном времени// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 89-94.

9. M. Bhardwaj, M. Rex, and A. Chandrakasan. Power-aware systems. In Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, volume 2, pages 1695–1701, 2000.
10. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: методы и технологии проектирования. СПб.-: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. Монография. 2020. С. 340.
11. Сазанов А.М., Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Асаул М.А., Титов В.О., Ващук А.Э., Буров И.А. О разработке интеллектуальной системы видеомониторинга морского пространства арктического региона. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 116-128.
12. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. p.211-215.

References

1. M. Bramberger, R. P. Pflugfelder, A. Maier, B. Rinner, B. Strobl, and H. Schwabach. A smart camera for traffi c surveillance. In Proceedings of the First Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pages 153–164, 2003.
2. W. Wolf, B. Ozer, and T. Lv. Smart cameras as embedded systems. IEEE Computer, 35(9):48–53, September 2002.
3. Cycinil A.K., Fahmi SH.S. Videosistemy na kristalle: novye arhitekturnye resheniya v zadachah obrabotki videoinformacii [Video systems on a chip: new architectural solutions in video information processing problems]// Datchiki i sistemy. 2011. № 4. S. 58-61.
4. Kostikova E.V., Fahmi SH.S., Hasan YA.A.A., Seliverstov S.A., Sobolev A.V., Podoprigora N.V. Adaptivnoe spektral'noe kodirovanie izobrazhenij v sistemah videonablyudeniya [Adaptive spectral coding of images in video surveillance systems]// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. T. 1. № 2 (48). S. 142-151.
5. Fahmi SH.S., Krylov YU.E., Hasan YA.A.A., Kostikova E.V. Kodek dlya peredachi morskih syuzhetov v usloviyah ogranichenij kanala [Codec for transmitting sea stories under channel restrictions]// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 164-171.
6. Fahmi SH.S., Bobrovskij A.I., Sokolov YU.M. Sintez ustrojstv piramidal'no-rekursivnogo kodirovaniya izobrazhenij na signal'nyh processorah [Synthesis of pyramid-recursive image encoding devices on signal processors]// Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 1. S. 78-89.
7. Berezin V.V., Fahmi SH.S., Bobrovskij A.I., Chernogorov V.S. Proizvoditel'nost' mnogoyadernyh sistem na kristalle firmy intel-fpga dlya obrabotki videoinformacii [Performance of multi-core systems on an intel-fpga chip for video information processing]// Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 3. S. 81-88.
8. Fahmi SH.S., Eid M.M., Kostikova E.V., Mukalo YU.I., Kryukova M.S., Zajdulin S.M. Klassifikaciya transportnyh sredstv v real'nom vremeni [Classification of vehicles in real time]// Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. № 3. S. 89-94.
9. M. Bhardwaj, M. Rex, and A. Chandrakasan. Power-aware systems. In Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, volume 2, pages 1695–1701, 2000.
10. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Kostikova E.V. Transportnye videosistemy na kristalle: metody i tekhnologii proektirovaniya. [Transport video systems on a chip: methods and technologies of design] SPb.-: Izdatel'sko-poligraficheskaya associaciya vysshih uchebnyh zavedenij. Monografiya. 2020. S. 340.
11. Sazanov A.M., Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Asaul M.A., Titov V.O., Vashchuk A.E., Burov I.A. O razrabotke intellektual'noj sistemy videomonitoringa morskogo prostranstva arkticheskogo regiona. [About the development of an intelligent video monitoring system of the Arctic region maritime space]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). S. 116-128.
12. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. p.211-215.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53., Тел. +7(812) 234-36-75., Ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13., Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75. Leading researcher at the Institute of transport problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12 Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: shakeebf@mail.ru

Святослав Александрович Селиверстов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Тел.: +(812) 748-96-45, м.т. 768, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Роза Равильевна Муksимова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.38. e-mail: rose.r.mux@gmail.com

Виктор Олегович Титов, кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7–9. Тел.: +7(812) 328-20-00, e-mail: v.o.titov@spbu.ru

Svyatoslav A. Seliverstov, PhD (Eng), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: seliverstov_s_a@mail.ru

Elena V. Kostikova, senior lecturer, (Eng) of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035. Russian Federation. Tel. +7(812) 748-96-45, i.p. 768, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Roza R. Muksimova, senior lecturer, PhD (Eng) at the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 38, Pilotov, St-Petersburg, 196210, Russian Federation, e-mail: rose.r.mux@gmail.com

Viktor O. Titov, senior lecturer, PhD (Econ), St. Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia Federation. Tel.: +7(812) 328-20-00, e-mail: v.o.titov@spbu.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021
Принята к публикации: 05.05.2021

УДК 502.51(282.247.41):504.5:665.6

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.016>

Совершенствование прогнозирования разливов нефти от подводных источников

В.С. Наумов¹ e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru, **А.Е. Пластинин**¹ e-mail: plastininae@yandex.ru,

А.Н. Каленков¹ e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru, **Н.С. Родина**¹ e-mail: rodina_n_s@mail.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. При прогнозировании процессов всплытия нефти от подводных источников в условиях открытой воды существует необходимость получения информации в ускоренном временном режиме для эффективного планирования защитных мероприятий в целях минимизации вреда окружающей среде, что возможно достичь совместным применением методов вычислительной гидродинамики и математической статистики. В работе приведено описание усовершенствованной математической модели всплытия нефтепродуктов от подводных источников. В целях повышения функциональности ранее созданной авторами системы уравнений связи для оценки параметров области возможного всплытия нефти увеличен диапазон изменения одного из ключевых независимых факторов – глубина водоема. В качестве факторов рассматривались: время всплытия, площадь области всплытия нефти, скорость глубинных течений, объем и тип разлитого нефтепродукта, глубина водоема. Новая регрессионная модель прогноза подводного движения разлива нефти обеспечивает прогнозирование распространения нефтяного загрязнения на морских акваториях. Представлены результаты оценки качества разработанной регрессионной модели прогноза подводного движения разлива нефти при всплытии, которая позволяет выполнять оценку параметров области всплытия нефти с одновременным учетом процессов растекания и перемещения под действием глубинных течений. Разработана методика прогноза подводного движения разлива нефти и алгоритм ее практической реализации. Определены структуры входных и выходных данных алгоритма. Приведен пример практического применения модели в Балтийском море.

Ключевые слова: разлив нефти, прогнозирование, подводные источники, область всплытия нефти, время всплытия нефти, координаты всплытия нефти, процессы растекания, действие глубинных течений.

Improving the forecasting of oil spills from underwater sources

Viktor S. Naumov¹ e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru, **Andrey E. Plastinin**¹ e-mail: plastininae@yandex.ru,

Aleksandr N. Kalenkov¹ e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru, **Natalia S. Rodina**¹ e-mail: rodina_n_s@mail.ru

¹Volga State University of Water Transport

Abstract. When predicting the processes of oil surfacing from underwater sources in open water conditions, there is a need to obtain information in an accelerated time mode for effective planning of protective measures in order to minimize environmental harm, which can be achieved by the combined application of computational fluid dynamics and mathematical statistics. The paper describes an improved mathematical model for the emergence of oil products from underwater sources. In order to increase the functionality of the system of constraint equations previously created by the authors for assessing the parameters of the area of possible oil flooding, the range of variation of one of the key independent factors, the depth of the reservoir, has been increased. The factors considered were the ascent time, the area of the oil surfacing, the speed of deep currents, the volume and type of spilled oil product, and the depth of the reservoir. The new regression model for predicting the underwater movement of an oil spill provides for predicting the spread of oil pollution in offshore areas. The paper presents the results of assessing the quality of the developed regression model for predicting the underwater movement of an oil spill during ascent, which makes it possible to assess the parameters of the area of oil ascending while taking into account the processes of spreading and movement under the influence of deep currents. A method for predicting the underwater movement of an oil spill and an algorithm for its practical implementation have been developed. The structures of the input and output data of the algorithm are determined. An example of the practical application of the model in the Baltic Sea is given.

Keywords: oil spill, forecasting, underwater sources, oil emersion area, time of oil emersion, coordinates of oil emersion, spreading process, deep currents influence.

Введение

К подводным источникам нефтяного загрязнения относятся: затонувшие суда и магистральные нефтепроводы, буровые установки и суда, платформы и другая морская техника, применяемая для разведки и добычи нефти на континентальном шельфе [1–3].

В работах [1–2] создана система уравнений связи для оценки параметров области возможного всплытия нефти (ОВН) от подводных источников, в которой в качестве зависимых факторов выступали время всплытия, координата центра, длина, ширина и площадь ОВН. В качестве независимых факторов рассматривались: объем и тип разлитого нефтепродукта, скорость течения, глубина водоема. Опыт практического применения данной

математической модели при разработке и отработке (в т.ч. в тренажерном режиме) бассейновых и объектовых планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти позволил выявить ее существенный недостаток, связанный с узким диапазоном изменения одного из ключевых независимых факторов – глубины водоема (до 10 м). Кроме этого опыт применения показал необходимость автоматизации расчетных процедур путем разработки специальной методики и ее дальнейшей алгоритмизации для обеспечения возможности ускоренной обработки информации во временном режиме не менее 1:500 и совместной работы с системами прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций, например PISCES II.

Выбор PISCES II обусловлен выходом целого ряда научных публикаций ведущих ученых разных

стран (Италии, Финляндии, Китая, Южной Кореи, Эстонии, Японии, Турции, Польши, Румынии, Великобритании, Словении, Греции, Кипра, Канады, Бразилии, США, России и др.), посвященные математическому моделированию в системе PISCES, ее апробации и верификации, примерам использования для организации мониторинга нефтяного загрязнения, выявления источников загрязнения, моделирования реальных и проектных (сценарных) чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти, локализации и ликвидации разливов нефти.

Например, в работах [4–5] турецких ученых морского факультета университета Dokuz Eylul в Измире выполнена оценка уровня производительности двух передовых программных систем разлива нефти OILMAP и PISCES 2 и делается вывод о высокой достоверности полученных результатов прогнозирования [4], в [5] отмечено, что программное обеспечение PISCES 2 предоставило высоконадежные решения для расчета скорости испарения и скорости дисперсии по сравнению с подходами, принятыми в научной литературе.

В работе [6] ученых Росого А., Purcarea A.A. (Бухарестский политехнический университет), Nicolae F., Cotocsea A. (Военно-морская академия в Констанце, Румыния) доказывается, что PISCES II – это программное обеспечение, которое можно использовать для прогноза разлива нефти и разработки эффективных мер реагирования. В этой статье анализируется случай затонувшего судна в прибрежной зоне Черного моря в Румынии в сентябре 2010 года.

В совместной работе [7] ученых Кипрского университета (Центр океанографии, Никосия), университета Саймона Фрейзера (Бернаби, Британская Колумбия, Канада), Фонда исследований и технологий Эллада (Институт прикладной и вычислительной математики, Гераклион, Крит, Греция), Кардиффского университета (Соединенное Королевство), Университета Аристотеля (Салоники, Греция), Греческого центра морских исследований, (Афины, Греция), Афинского университета (группа по физике океана и моделированию, Греция) представлен перечень наиболее известных нефтяных моделей, в т.ч. PISCES.

Метод мониторинга пространственно-временного развития разливов нефти в морской среде с использованием программного обеспечения для моделирования PISCES II создан учеными Военно-морской академии в Констанце и Трансильванского университета в Румынии [8].

В работе [9] ученых Корейского научно-исследовательского института кораблестроения и океанотехники (Тэджон, Южная Корея) и Школы океанологии и технологий (Пусан, Южная Корея) отмечается важность точной оценки траектории разлива нефти для эффективного реагирования на разлива нефти, в т.ч. в системе моделирования PISCES.

Люблянский университет (факультет гражданской и геодезической инженерии), Национальный институт биологии и Институт Йозефа Стефана (Словения) при разработке трехмерной модели Лагранжа для моделирования разливов нефти Nafta3D для расчета процессов переноса и эволюции

нефти (адвекция, диспергирование, механическое растекание, испарение, эмульгирование применили основные уравнения модели PISCES [10].

В статье [11], написанной учеными из Университета Хельсинки, Центра морских исследований в Котке и Университета Аалто (Финляндия) утверждается, что для прогнозирования разливов нефти в Балтийском море следует использовать более инклюзивные модели дрейфа нефти, в том числе Seatrack Web и PISCES, чтобы иметь возможность оценивать подверженность видов нефтяному загрязнению более реалистичным образом.

В совместной работе [12] турецких («Petraiko Oil & Gas Exploration Ltd», Государственная метеорологическая служба Турции, Анкара) и эстонских ученых (Эстонский морской институт, университет Тарту) система PISCES успешно применена для моделирования распространения разлитой нефти в прибрежной зоне восточной части Черного моря.

Результатом совместных исследований [13] японских (Геологическая служба Хоккайдо, Департамент морских геолого-геофизических исследований, Институт Инаоки) и эстонских (Эстонский морской институт, университет Тарту) ученых стало веб-приложение, которое объединяет систему PISCES 2 и карты индекса чувствительности окружающей среде (ESI) для оценки экологических рисков, а также байесовский инструмент для принятия и поддержки консенсусных решений по ликвидации разливов нефти в Охотском море.

В работе [14] эстонских ученых (Институт географии и Эстонский морской институт Университета Тарту, Эстонская морская академия) представлены результаты применения систем Seatrack Web и PISCES II для прогнозирования разливов нефти в Балтийском море, создана интегрированная среда для моделирования реагирования на нефтяные аварии (PISCES II, инструменты пространственного моделирования ArcGis и байесовские сети доверия), которая оказалась полезной для поддержки оперативных решений в случае гипотетической нефтяной аварии.

Исследователи из Люблянского университета (Словения), Морского университета Щецина (Тренажерный центр LNG & LCH, Польша) и Военно-морской академии "Мирча чел Батран" (Констанца, Румыния) выполнили ретроспективное моделирование с использованием системы моделирования разлива нефти PISCES 2 и успешно отследили потенциального загрязнителя, идентификация которого была дополнительно проверена словенским государственным инспектором порта [15]. Разлив был обнаружен примерно через 5 часов после сброса. Трек судна был доступен в аварийном отчете на основе информации AIS, интегрированной в систему CSN (обнаружение CleanSeaNet 22 марта 2013 года в хорватских водах).

В статье [16] представлены результаты моделирования в системе PISCES 2 разлива нефти в районе ливанского побережья.

В работах [17–19] ученых Морского университета Щецина приведены результаты исследований, связанных с оптимальным размещением судов реагирования на разливы нефти в Балтийском море

с использованием точной модели PISCES 2 [17]; в работе [18] сценарии моделирования в системе PISCES 2 были построены для двух потенциальных точек разлива нефти в Балтийском море: первая в Гданьском заливе, а другая - в окрестностях Борнхольма в соответствии с «Национальным планом борьбы с угрозами и загрязнением окружающей среды на море»; в статье [19] представлены результаты анализа математической модели системы PISCES II и поведения нефтяного пятна в различных гидрометеорологических условиях.

В совместных работах [20-21] ученых Люблянского университета (Словения) и Морского университета Щецина (Польша) разработан двухэтапный метод оптимизации размещения морских сил по борьбе с разливами нефти и оценки затрат, связанных с этими действиями на Балтийском море с применением системы PISCES II [20]. Значительный интерес представляют результаты [21] реконструкции в системе PISCES II разлива нефти при аварии судна «Baltic Carrier» в Балтийском море. Авторами [21] утверждается, что PISCES II показал хорошую корреляцию с реальными данными, особенно в случае оценки количества нефтепродукта, загрязнившего пляж.

Другим успешным примером реконструкции разлива нефти и сравнения различных способов локализации и ликвидации чрезвычайной ситуации в системе PISCES 2 является работа [22] турецких ученых (Университет Пири Рейс, Стамбульский технический университет), посвященная аварии танкера Nassia 1994 года.

Идентификация источников загрязнения морской среды путем обратного счета с помощью спутниковых изображений в системе PISCES 2 [23] выполнена с участием Люблянского университета (Словения), Европейской комиссии, Национального института океанографии и экспериментальной геофизики (Италия), Греческого центра морских исследований, Shell Global Solutions International.

Устранение выявленных недостатков математической модели всплытия нефтепродуктов от подводных источников возможно путем численного моделирования сценариев всплытия нефти в условиях разных глубин на сетке начального уровня, усовершенствования математической модели и разработки специальной методики, ее дальнейшей алгоритмизации и интеграции в виде модуля для обеспечения совместной работы в системе PISCES II.

Модуль должен обеспечивать прогнозирование и визуальное отображение текущего состояния распространения нефтяного загрязнения в толще воды (при разливах из подводных источников) с дискретностью от 10 метров по глубине.

Цель работы: совершенствование математической модели и разработка методики прогноза подводного движения разлива с учётом всплытия углеводородной среды, влияния глубинных течений и взаимодействия с водной средой с возможностью ускоренной обработки информации во временном режиме не менее 1:500.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать методы решения задач прогнозирования при разливах из подводных

источников и всплытии углеводородной среды на свободную поверхность.

2. Исследовать влияние факторов (тип нефтепродукта, объем разлива, скорость течения, глубина, температура воды) на время, координаты и площадь ОВН на свободную поверхность.

3. Разработать математическую (регрессионную) модель оценки параметров ОВН на свободную поверхность.

4. Определить структуру входных и выходных данных модуля прогнозирования при разливах из подводных источников и всплытии углеводородной среды на свободную поверхность.

5. Разработать общее описание алгоритма решения задач модуля прогнозирования при разливах из подводных источников.

Материалы и методы

В качестве модельной области выбран участок Балтийского моря в районе заповедника «Куршская коса». На этом участке наблюдается интенсивное движение флота, в т.ч. нефтеналивного, осуществляется добыча углеводородов в шельфовой зоне (Кравцовское месторождение нефти), что определяет высокий уровень риска разливов нефти [2, 24].

На основе рекомендаций [1] выбраны следующие независимые факторы: время всплытия, площадь ОВН, скорость течения, объем (масса) и тип разлитого нефтепродукта (через плотность), глубина моря.

Для определения экстремальных значений независимых факторов использовались данные системы PISCES II, результаты приведены в табл. 1.

При формировании перечня сценариев численного моделирования применялся метод планирования эксперимента и дробный двухуровневый план Бокса и Хантера в математической системе STATISTICA 8.0 (см. табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента для дробного двухуровневого плана Бокса и Хантера

N/ N	Независимые факторы			
	Плотность, т/м ³	Масса, т	Скорость течения, м/с	Глубина, м
1.	205,0	1,0	0,05	10,0
2.	860,0	1,0	0,05	100,0
3.	205,0	10,0	0,05	100,0
4.	860,0	10,0	0,05	10,0
5.	205,0	1,0	0,3	100,0
6.	860,0	1,0	0,3	10,0
7.	205,0	10,0	0,3	10,0
8.	860,0	10,0	0,3	100,0

Численное моделирование сценариев всплытия нефти на сетке начального уровня выполнялось в программном продукте FlowVision, возможность применения которого для достижения поставленных задач и разработки методики прогноза подводного движения разлива с возможностью ускоренной обработки информации во временном режиме не менее 1:500 показана в работах [1-2].

В качестве примера на рис. 1 – 4 приведены полученные конфигурации областей возможного

всплытия нефти на расстоянии 50 и 100 м от дна водоёма для смоделированного в программном продукте FlowVision сценария 3 (плотность нефти 205 кг/м³, масса разлива 10т, скорость течения 0,05 м/с, глубина 100 м.)

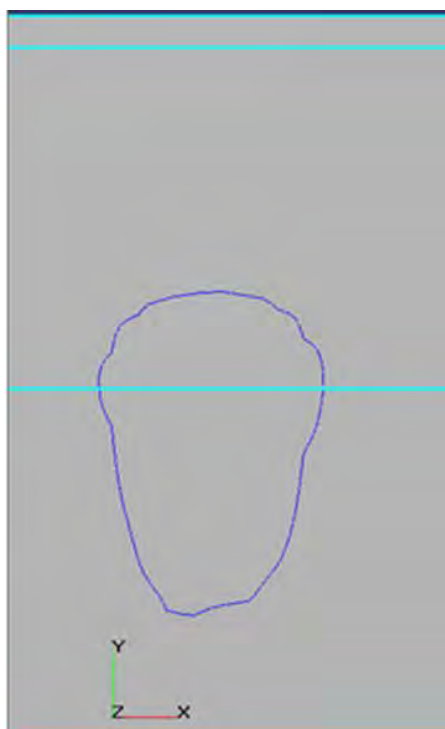


Рис. 1. Положение пятна нефти на расстоянии 50 м от дна водоёма (вертикальный разрез)

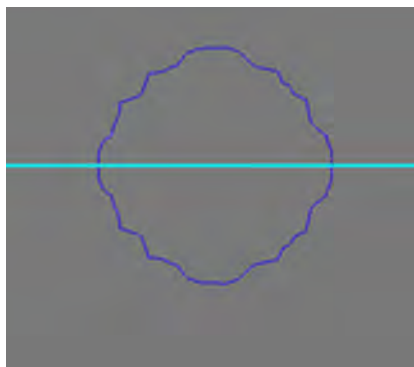


Рис. 2. Положение пятна нефти на расстоянии 50 м от дна водоёма (вид сверху)

Результаты и обсуждение

При численном моделировании сценариев всплытия нефти оценивались следующие параметры ОВН: площадь, время всплытия, длина, ширина, координаты центра.

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 2.



Рис. 3. Положение пятна нефти на расстоянии 100 м от дна водоёма (пятно нефти достигло поверхности, вертикальный разрез)

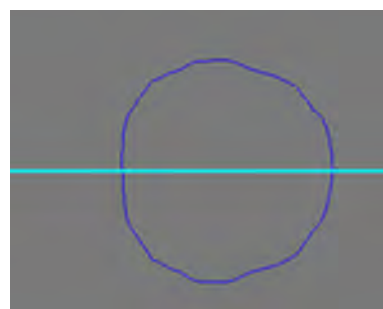


Рис. 4. Положение пятна нефти на расстоянии 100 м от дна водоёма (пятно нефти достигло поверхности, вид сверху)

Таблица 2

Результаты численного эксперимента

N/ N	Характеристики области всплытия нефти				
	время всплытия, t _в , с	координата центра ОВН, X _ц , м	длина ОВН, L, м	ширина ОВН, В, м	Площадь ОВН, S, м ²
1.	5,47	1,1	18,7	18,0	336,6
2.	62,07	6,0	44,2	43,4	1918,28
3.	28,83	2,5	45,0	44,4	1998,0
4.	30,99	4,05	20,9	20,0	418,0
5.	33,18	7,06	31,1	31,6	982,76
6.	35,0	9,0	40,0	17,0	680,0
7.	6,22	5,3	22,6	19,8	447,48
8.	64,97	11,25	49,5	49,0	2425,5

Уравнения для оценки времени всплытия, координаты центра, длины и ширины ОВН имеют вид:

$$t_B = 0,045\rho - 0,131M + 12,01v + 0,309H - 9,309 \quad (1)$$

$$X_{Ц} = 0,005\rho + 0,001M + 18,96v + 0,02H - 1,565 \quad (2)$$

$$L = 0,014\rho + 0,111M + 14,4v + 0,187H + 12,98 \quad (3)$$

$$B = 0,005\rho + 0,644M - 8,4v + 0,26H + 10,854 \quad (4)$$

$$S = 0,64\rho + 38M - 135,1v + 15,1H - 207,3 \quad (5)$$

где t_B – время всплытия нефтепродуктов, с; $X_{Ц}$, L , B , S – параметры нефтяного пятна, соответственно координаты центра (м), длины (м), ширины (м) и площади (m^2); ρ – плотность нефтепродукта, g/cm^3 ; M – масса нефтепродукта, т; v – скорость морского глубинного течения, м/с; H – глубина моря, м.

На основании данных табл. 2 в программе STATISTIKA получены коэффициенты множественной корреляции R^2 для полиномов 1, 2 и 3-ей степени. Результаты расчёта коэффициентов рассматриваемых моделей представлены в табл. 3.

Таблица 3
Коэффициенты множественной корреляции для полиномов 1, 2 и 3-ей степени

Степень полинома	коэффициент множественной корреляции R^2				
	время всплытия, t_B , с	координата центра ОВН, $X_{Ц}$, м	длина ОВН, L , м	ширина ОВН, B , м	Площадь ОВН, S , m^2
1	0,995	0,995	0,84	0,949	0,88
2	0,854	0,831	0,83	0,791	0,725
3	0,717	0,742	0,75	0,633	0,668

Результаты оценки параметров в полученных уравнениях связи представлены в табл. 4-8.

Таблица 4
Оценки параметров для времени всплытия

Показатель	Стандартная ошибка	t	p	-95,00% Доверительный интервал	+95,00% Доверительный интервал	Бета
св.член	2,36	-3,94	0,03	-16,82	-1,79	-
плотность	0,0025	18,52	0,003	0,038	0,05	0,727
масса	0,179	-0,73	0,518	-0,7	0,44	-0,029
скорость течения	6,445	1,86	0,159	-8,5	32,52	0,073
глубина	0,018	17,28	0,004	0,25	0,37	0,679

Сравнение результатов теоретической зависимости времени всплытия нефти t_B , координаты центра $X_{Ц}$, длины L , ширины B и площади S ОВН на поверхности водоёма с результатами эксперимента показало хорошее совпадение (табл. 9-13).

Таблица 5
Оценки параметров для координаты центра ОВН

Показатель	Стандартная ошибка	t	p	-95,00% Доверительный интервал	+95,00% Доверительный интервал	Бета
св.член	0,4	-3,9	0,03	-2,84	-0,29	-
плотность	0,0004	13,1	0,001	0,004	0,007	0,57
масса	0,03	-0,055	0,96	-0,098	0,095	-0,002
скорость течения	1,09	17,33	0,0004	15,48	22,44	0,76
глубина	0,003	6,73	0,007	0,01	0,03	0,29

Таблица 6
Оценки параметров для длины ОВН

Показатель	Стандартная ошибка	t	p	-95,00% Доверительный интервал	+95,00% Доверительный интервал	Бета
св.член	9,89	1,31	0,28	-18,49	44,45	-
плотность	0,01	1,38	0,26	-0,018	0,047	0,407
масса	0,75	0,15	0,89	-2,275	2,497	0,044
скорость течения	26,99	0,53	0,63	-71,5	100,3	0,157
глубина	0,075	2,5	0,09	-0,051	0,426	0,739

Для полученных регрессионных уравнений коэффициент множественной корреляции $R^2 > 0,80$, что свидетельствует о высокой степени адекватности этих уравнения смоделированному процессу и

позволяет определить структуру входных и выходных данных методики прогноза подводного движения разлива (общего описания алгоритма решения задач прогнозирования).

Анализ значимости факторов, входящих в состав уравнений связи (рис. 5 – 9, см. табл. 4-8), показал: на координату центра ОВН Хц наибольшее влияние оказывает скорость течения и плотность; на длину ОВН L наибольшее влияние оказывает глубина и плотность нефтепродукта; на ширину ОВН В наибольшее влияние оказывает глубина и масса разлитого нефтепродукта; на площадь ОВН S и время всплытия t_v наибольшее влияние оказывает глубина и плотность разлитого нефтепродукта.

Таблица 7

Оценки параметров для ширины ОВН

Показатель	Стандартная ошибка	t	p	-95,00% Доверительный интервал	+95,00% Доверительный интервал	Бета
св.член	4,81	2,26	0,11	-4,45	26,16	-
плотность	0,005	1,19	0,32	-0,01	0,022	0,16
масса	0,37	1,8	0,175	-0,52	1,8	0,23
скорость течения	13,13	-0,64	0,57	-50,17	33,37	-0,08
глубина	0,04	7,1	0,006	0,14	0,38	0,93

Таблица 8

Оценки параметров для площади ОВН

Показатель	Стандартная ошибка	t	p	-95,00% Доверительный интервал	+95,00% Доверительный интервал	Бета
св.член	457,5	-0,45	0,68	-1663,3	1248,6	-
плотность	0,48	1,34	0,27	-0,88	2,157	0,27
масса	34,7	1,1	0,35	-72,29	148,48	0,22
скорость течения	1248,66	-0,11	0,92	-4108,94	3838,7	-0,02
глубина	3,47	4,36	0,02	4,08	26,156	0,87

Основные входные данные:

- координаты источника разлива,
- глубина водного объекта,
- объем (масса) разлива,
- тип источника (точечный или течь),
- тип нефтепродукта (плотность - учёт оценки факторов дестабилизации и подавления (перевод в осадки или газогидраты) выполняется через плотность),
- поле глубинных течений,
- дата разлива,
- наличие или отсутствие льда,
- дискретность предоставления выходных данных.

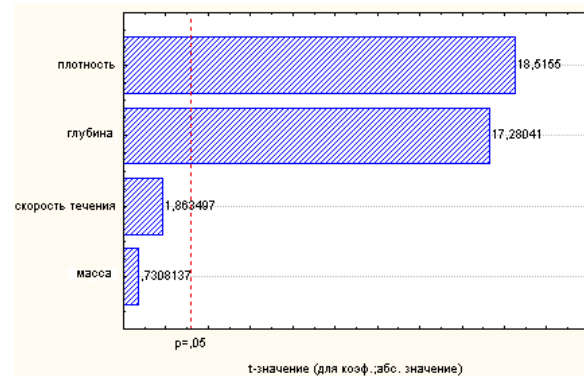


Рис. 5. Карта Парето для времени всплытия

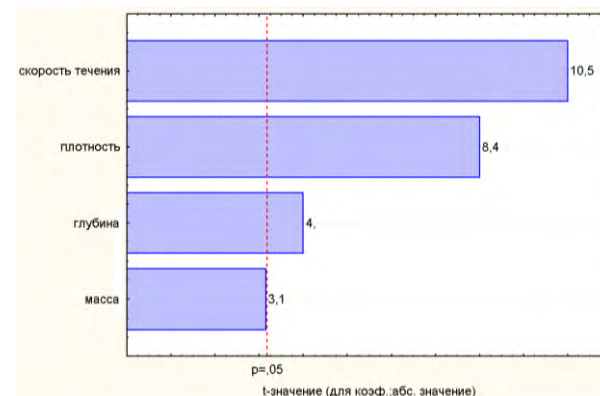


Рис. 6. Карта Парето для координаты центра ОВН

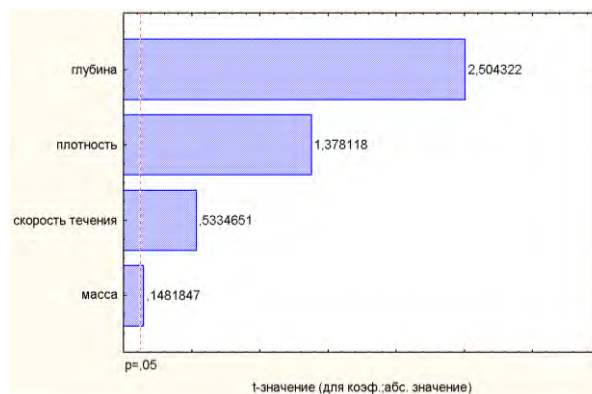


Рис. 7. Карта Парето для длины ОВН

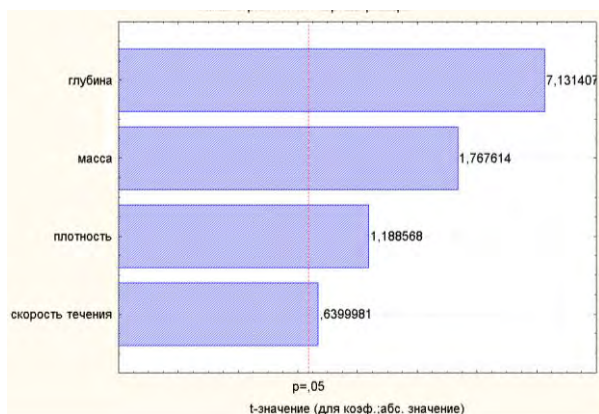


Рис. 8. Карта Парето для ширины ОВН

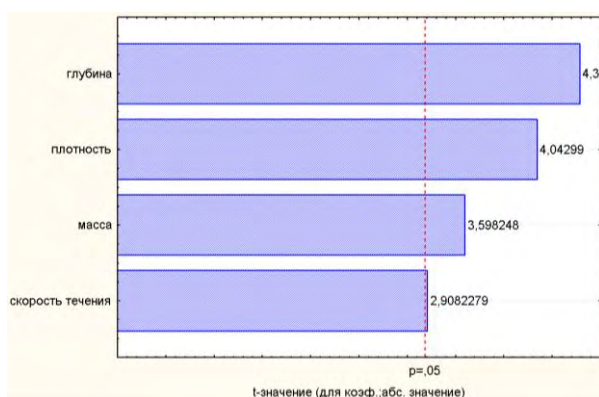


Рис. 9. Карта Парето для площади ОВН

Основные выходные данные:

- подводная траектория нефтяного загрязнения с указанием параметров (время, координаты и площадь),
- оценки параметров ОВН (время, координаты и площадь),
- визуальное отображение текущего состояния распространения нефтяного загрязнения в толще воды.

Таблица 9

Наблюдаемые, предсказанные и значения остатков для времени всплытия

Номер наблюдения	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Значения остатков
1	5,47	3,59125	1,87875
2	62,07	61,26625	0,80375
3	28,83	30,25625	-1,42625
4	30,99	32,24625	-1,25625
5	33,18	34,43625	-1,25625
6	35,00	36,42625	-1,42625
7	6,22	5,41625	0,80375
8	64,97	63,09125	1,87875

Таблица 10
Наблюдаемые, предсказанные и значения остатков для координаты центра ОВН

Номер наблюдения	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Значения остатков
1	1,1	0,7075	0,3925
2	6,0	6,1325	-0,1325
3	2,5	2,5325	-0,0325
4	4,05	4,2775	-0,2275
5	7,06	7,2875	-0,2275
6	9,0	9,0325	-0,0325
7	5,3	5,4325	-0,1325
8	11,25	10,8575	0,3925

Применение методов регрессионного анализа при разработке методики прогноза подводного движения разлива обеспечивает возможность ускоренной обработки информации во временном режиме не менее 1:500.

Таблица 11

Наблюдаемые, предсказанные и значения остатков для длины ОВН

Номер наблюдения	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Значения остатков
1	18,7	18,6	0,1
2	44,2	44,8	-0,6
3	45,0	36,5	8,5
4	20,9	28,9	-8,0
5	31,1	39,1	-8,0
6	40,0	31,5	8,5
7	22,6	23,2	-0,6
8	49,5	49,4	0,1

Таблица 12

Наблюдаемые, предсказанные и значения остатков для ширины ОВН

Номер наблюдения	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Значения остатков
1	18,0	14,9	3,1
2	43,4	42,2	1,2
3	44,4	44,1	0,3
4	20,0	24,6	-4,6
5	31,6	36,2	-4,6
6	17,0	16,7	0,3
7	19,8	18,6	1,2
8	49,0	45,9	3,1

Таблица 13
Наблюдаемые, предсказанные и значения остатков для площади ОВН

Номер наблюдения	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Значения остатков
1	336,6	106,378	230,222
2	1918,28	1886,228	32,052
3	1998,0	1809,828	188,172
4	418,0	868,447	-450,447
5	982,76	1433,208	-450,448
6	680,0	491,828	188,172
7	447,48	415,428	32,053
8	2425,5	2195,278	230,222

Основу методики составляет алгоритм решения задач прогнозирования, который можно представить в виде следующей последовательности:

- 1) Вход.
- 2) Импорт из базы данных или ввод вручную: Координаты источника разлива.
- 3) Импорт из базы данных или ввод вручную: Глубина моря.
- 4) Импорт из базы данных или ввод вручную: Тип источника (точечный или течь).
- 5) Импорт из базы данных или ввод вручную: Объем (масса) разлива.
- 6) Импорт из базы данных или ввод вручную: Тип и п
- 7) Автоматический или ручной ввод: Дата разлива.
- 8) Автоматический или ручной ввод: наличие льда или отсутствие льда.
- 9) Ручной ввод: дискретность предоставления выходных данных.
- 10) Импорт из базы данных: поле глубинных речений.
- 11) Обработка базы данных по глубинным речениям в районе источника разлива: определение максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H)+0,5$ часа в радиусе 1 км от источника разлива.
- 12) Расчет максимального времени всплытия по формуле:

$$t_{в\ max} = 0,045\rho - 0,131M + 12,01v_{max} + 0,309H - 9,309, c \quad (6)$$
- 13) Обработка базы данных по глубинным речениям в районе источника разлива: определение зон с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 14) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 15) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 16) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 17) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 18) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 19) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 20) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 21) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 22) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 23) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 24) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 25) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.
- 26) Расчет максимальной скорости течения и его генерального направления во временном интервале $ЧС(H) + t_{в\ max}$ в радиусе 1 км от источника разлива.

14) Расчет подводной траектории нефтяного загрязнения в зонах с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением по формулам:

$$X_{ци} = 0,005\rho - 0,001M + 18,96v_i + 0,02H_i - 1,565, м \quad (7)$$

$$H_i = H_{i+1} - H_{i-1} \quad (8)$$

где i – индексная переменная для обозначения зон с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением.

15) Расчет подводной траектории нефтяного загрязнения по заданной дискретности предоставления выходных данных по формулам:

$$X_{циj} = 0,005\rho - 0,001M + 18,96v_{ij} + 0,02H_j - 1,565, м \quad (9)$$

$$H_j = H_{j+1} - H_{j-1} \quad (10)$$

где j – индексная переменная для обозначения заданной дискретности предоставления выходных данных.

16) Расчет длины ОВН в зонах с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением по формулам:

$$L_i = 0,014\rho + 0,111M + 14,4v_i + 0,187H_i + 12,98, м \quad (11)$$

17) Расчет длины ОВН по заданной дискретности предоставления выходных данных по формулам:

$$L_j = 0,014\rho + 0,111M + 14,4v_{ij} + 0,187H_j + 12,98, м \quad (12)$$

18) Расчет ширины ОВН в зонах с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением по формулам:

$$B_i = 0,005\rho + 0,644M - 8,4v_i + 0,26H_i + 10,854, м \quad (13)$$

19) Расчет ширины ОВН по заданной дискретности предоставления выходных данных по формулам:

$$B_j = 0,005\rho + 0,644M - 8,4v_{ij} + 0,26H_j + 10,854, м \quad (14)$$

20) Расчет площади ОВН в зонах с равной скоростью течения и одинаковым генеральным направлением по формуле:

$$S_i = 0,64\rho + 38M - 135,1v_i + 15,1H_i - 207,3, м^2 \quad (15)$$

21) Расчет площади ОВН по заданной дискретности предоставления выходных данных по формуле:

$$S_j = 0,64\rho + 38M - 135,1v_{ij} + 15,1H_j - 207,3, м^2 \quad (16)$$

22) Расчет времени всплытия нефтяного загрязнения на глубину H_i по формуле:

$$t_{би} = 0,045\rho - 0,131M + 12,01v_i + 0,309H_i - 9,309, c \quad (17)$$

23) Расчет времени всплытия нефтяного загрязнения на глубину H_j по формуле:

$$t_{bj} = 0,045\rho - 0,131M + 12,01v_{ij} + 0,309H_j - 9,309, c \quad (18)$$

24) Отображение текущего состояния распространения нефтяного загрязнения в толще воды (при разливах из подводных источников) с дискретностью от 10 метров по глубине.

25) Построение подводной траектории нефтяного загрязнения с указанием параметров (время, координаты и площадь).

26) Выход.

На рис. 10-11 представлены варианты визуального отображения текущего состояния распространения нефтяного загрязнения в толще воды с дискретностью от 10 метров по глубине.

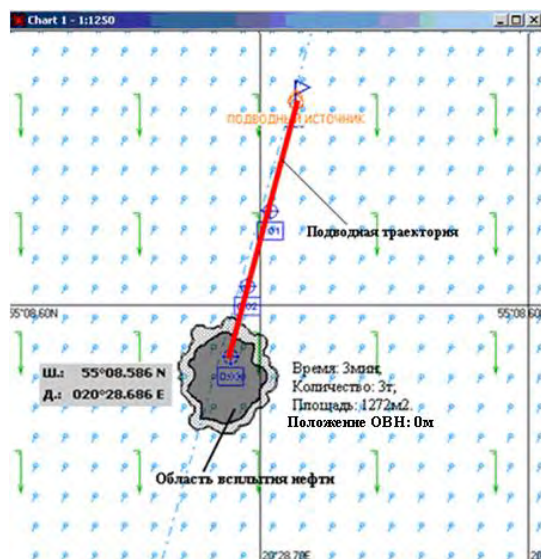


Рис. 10. Отображение проекции подводной траектории нефтяного загрязнения на навигационной карте от источника ЧС(Н) в Балтийском море (глубина в месте разлива 30 м)

Заключение

Путем совместного применения методов вычислительной гидродинамики и математической статистики выполнено совершенствование математической модели всплытия нефтепродуктов от подводных источников. В целях повышения функциональности ранее созданной авторами системы уравнений связи для оценки параметров области возможного всплытия нефти увеличен с 10 до 100 м диапазон изменения одного из ключевых независимых факторов – глубина водоема. Новая регрессионная модель прогноза подводного движения разлива нефти обеспечивает прогнозирование распространения нефтяного загрязнения на морских акваториях.

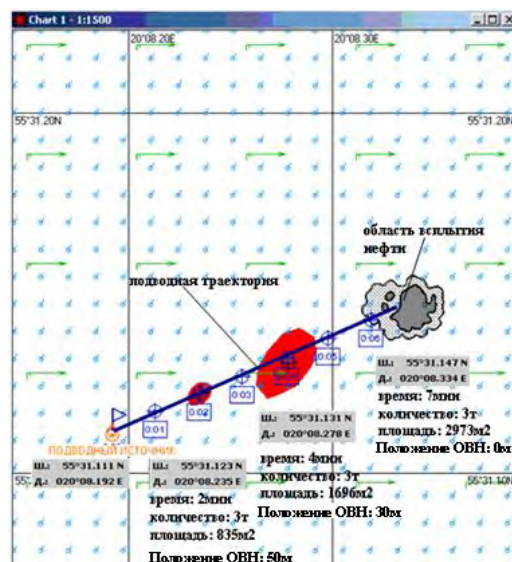


Рис. 11. Отображение проекции подводной траектории нефтяного загрязнения на навигационной карте от источника ЧС(Н) в Балтийском море (глубина в месте разлива 70 м)

Полученные результаты оценки качества разработанной регрессионной модели прогноза подводного движения разлива нефти подтвердили возможность выполнения адекватного расчета параметров области всплытия нефти с одновременным учетом процессов растекания и перемещения под действием глубинных течений.

Разработанный алгоритм обеспечивает в составе программно-аппаратного комплекса PISCES II выполнение прогнозирования распространения нефтяного загрязнения при утечке через подводные источники с учётом всплытия углеводородной среды на свободную поверхность, влияния глубинных течений и взаимодействия с водной средой.

Модуль прогнозирования предназначен для моделирования развития чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефти (ЧС(Н)) от подводных источников и обеспечивает решение следующих задач:

- прогнозирование подводного движения разлива или газопроявления с учётом оценки факторов их дестабилизации и подавления (перевод в осадки или газогидраты) путем построения подводной траектории нефтяного загрязнения с представлением промежуточных (в толще водотока) положений пятна на требуемые пользователем моменты времени;
- оценка параметров ОВН (время, координаты, площадь, длина, ширина);
- визуальное отображение текущего состояния распространения нефтяного загрязнения в толще воды (при разливах из подводных источников) с дискретностью от 10 метров по глубине, приведен пример практического применения модели в Балтийском море (см. рис. 10-11);
- возможность ускоренной обработки информации во временном режиме не менее 1:500.

Литература

1. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков А.Н. Оценка нефтяного загрязнения от подводных источников. Журнал университета водных коммуникаций. 2013. №17(1). С.90-94.
2. Наумов В.С., Пластинин А.Е., Каленков В.С., Отделкин Н.С. Моделирование всплытия нефти от подводных источников в ледовых условиях. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-4 (42). С. 87-91.
3. Решняк В.И., Захаров В.Н., Мизгирев Д.С., Слюсарев А.С. Оценка экологических рисков при аварийных разливах нефти на объектах водного транспорта. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 85-90.
4. Toz, A.C. & Buber, M. (2018). Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill. Environmental monitoring and assessment, 190 (9): 551.
5. Toz, A.C., Koseoglu, B. (2018). Trajectory prediction of oil spill with Pisces 2 around Bay of Izmir, Turkey. Marine Pollution Bulletin, 126: 215-227.
6. Pocora, A., Purcareea, A.A., Nicolae, F., Cotorcea, A. (2018). Modelling and simulation of oil spills in coastal waters. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 172(1), 012012.
7. Zodiatis, G., Lardner, R., Alves, T.M., Krestenitis, Y., Perivoliotis, L., Sofianos, S., Spanoudaki, K. (2017). Oil spill forecasting (prediction) Journal of Marine Research, 75(6): 923-953.
8. Nicolae, F., Perkovic, M., Ristea, M., Cotorcea, A. (2016). Method for monitoring the space-Time development of oil spilled in marine environment using Pisces II simulation software. Journal of Environmental Protection and Ecology, 17(1): 136-145.
9. Lee, M., Jung, J.-Y. (2015). Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea. Marine Pollution Bulletin, 100(1): 297-303.
10. Ramšak, V. et. al. (2013). High-resolution pollutant dispersion modelling in contaminated coastal sites. Environmental Research, 125: 103-112.
11. Helle, I., Lecklin, T., Jolma, A., Kuikka, S. (2011). Modeling the effectiveness of oil combating from an ecological perspective - A Bayesian network for the Gulf of Finland; the Baltic Sea. Journal of Hazardous Materials, 185(1): 182-192.
12. Acir, O., Aps, R., Fetissov, M., Sert, M. (2011). Environmental impact assessment based on a potential oil spill scenario: Eastern Black Sea coastal zone, Turkey. WIT Transactions on Ecology and the Environment 149: 273-283.
13. Aps, R., Sawano, N., Hamada, S., Fetissov, M. (2010). Bayesian inference in oil spill response management. WIT Transactions on Information and Communication Technologies. Vol 43, PART I: PI35-PI46.
14. Leiger, R., Aps, R., Fetissov, M., Herkül, K., Kopti, M., Kotta, J., Mander, Ü., Suursaar, Ü. (2009). Oil accident response simulation: Allocation of potential places of refuge. WIT Transactions on Ecology and the Environment 126: 247-258.
15. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. Scientific Bulletin of Naval Academy 19(1): 85-90.
16. Perkovic M., Sitkov A. (2008). Oil spill modeling and combat. Maritime industry, ocean engineering and coastal resources - proceedings of the 12th international congress of the international maritime association of the Mediterranean, IMAM 2007: 1161-1169.
17. K Łazuga, L Gućma. (2016). Genetic algorithm method for solving the optimal allocation of response resources problem on the example of polish zone of the Baltic Sea. Journal of KONBiN 2(38): 291-310.
18. Gućma L., Juszkiewicz W., Łazuga K. (2012). The Method of Optimal Allocation of Oil Spill Response in the Region of Baltic Sea, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 6, No. 4, pp. 489-493.
19. Łazuga K. (2012) Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, 32(104) z. 2 pp. 105–109.
20. K Łazuga, L Gućma, M Perkovic. (2018). The model of optimal allocation of maritime oil spill combat ships. Sustainability 10 (7), 2321.
21. K Łazuga, L Gućma, M Perkovic. (2013). M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 36(108) z. 1 pp. 110–115.
22. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydın Şihmantepe, Murat Selçuk Solmaz. (2020). A case study on oil pollution in Istanbul Strait: Revisiting 1994 Nassia tanker accident by utilising Potential Incident Simulation Control and Evaluation System (PISCES-II) simulation. What would be different in terms of response if Nassia accident happened today? Marine Pollution Bulletin. Volume 151:110813.
23. Perkovic M., Greidanus H., Muellenhoff O., Ferraro G., Pavlakis P., Cosoli S. and Harsch R. (2010). Marine polluter identification: Backtracking with the aid of satellite imaging, Fresenius Environmental Bulletin, Vol. 19, No 10b, pp 2426-2432.
24. Решняк В.И., Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С. Экологическое обеспечение водного туризма. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-2 (46). С. 154-160.

References

1. Naumov V.S., Plastinin A.E., Kalenkov A.N. Ocenka neftjanogo zagrjaznenija ot podvodnyh istochnikov, Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij. 2013. №17(1). S.90-94..
2. Viktor S. Naumov, Andrey E. Plastinin, Aleksandr N. Kalenkov, Nikolai S. Otdelkin. Modeling of oil floating from underwater sources, in ice conditions. Marine intellectual technologies. 2018. № 4 (42) V.2. p. 87-91.

3. Valery I. Reshnyak, Vasily N. Zakharov, Dmitriy S. Mizgiriyov, Anatoliy.S. Slyusarev. The ecological risk assessment during accidental oil spills at water transport objects. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 (46) V.2. p. 85-90.
4. Toz, A.C. & Buber, M. (2018). Performance evaluation of oil spill software systems in early fate and trajectory of oil spill: comparison analysis of OILMAP and PISCES 2 in Mersin bay spill. *Environmental monitoring and assessment*, 190 (9): 551.
5. Toz, A.C., Koseoglu, B. (2018). Trajectory prediction of oil spill with Pisces 2 around Bay of Izmir, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 126: 215-227.
6. Pocora, A., Purcarea, A.A., Nicolae, F., Cotorcea, A. (2018). Modelling and simulation of oil spills in coastal waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 172(1), 012012.
7. Zodiatis, G., Lardner, R., Alves, T.M., Krestenitis, Y., Perivoliotis, L., Sofianos, S., Spanoudaki, K. (2017). Oil spill forecasting (prediction) *Journal of Marine Research*, 75(6): 923-953.
8. Nicolae, F., Perkovic, M., Ristea, M., Cotorcea, A. (2016). Method for monitoring the space-Time development of oil spilled in marine environment using Pisces II simulation software. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 17(1): 136-145.
9. Lee, M., Jung, J.-Y. (2015). Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1): 297-303.
10. Ramšak, V. et. al. (2013). High-resolution pollutant dispersion modelling in contaminated coastal sites. *Environmental Research*, 125: 103-112.
11. Helle, I., Lecklin, T., Jolma, A., Kuikka, S. (2011). Modeling the effectiveness of oil combating from an ecological perspective - A Bayesian network for the Gulf of Finland; the Baltic Sea. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1): 182-192.
12. Acir, O., Aps, R., Fetissov, M., Sert, M. (2011). Environmental impact assessment based on a potential oil spill scenario: Eastern Black Sea coastal zone, Turkey. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 149: 273-283.
13. Aps, R., Sawano, N., Hamada, S., Fetissov, M. (2010). Bayesian inference in oil spill response management. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*. Vol 43, PART I: PI35-PI46.
14. Leiger, R., Aps, R., Fetissov, M., Herkül, K., Kopti, M., Kotta, J., Mander, Ü., Suursaar, Ü. (2009). Oil accident response simulation: Allocation of potential places of refuge. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 126: 247-258.
15. M. Perkovic, M. Ristea, K. Lazuga. (2015). Simulation based emergency response training. *Scientific Bulletin of Naval Academy* 19(1): 85-90.
16. Perkovic M., Sitkov A. (2008). Oil spill modeling and combat. *Maritime industry, ocean engineering and coastal resources - proceedings of the 12th international congress of the international maritime association of the Mediterranean*, IMAM 2007: 1161-1169.
17. K Łazuga, L Gucma. (2016). Genetic algorithm method for solving the optimal allocation of response resources problem on the example of polish zone of the Baltic Sea. *Journal of KONBiN* 2(38): 291-310.
18. Gucma L., Juszkiewicz W., Łazuga K. (2012). The Method of Optimal Allocation of Oil Spill Response in the Region of Baltic Sea, *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 6, No. 4, pp. 489-493.
19. Łazuga K. (2012) Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 32(104) z. 2 pp. 105–109.
20. K Łazuga, L Gucma, M Perkovic. (2018). The model of optimal allocation of maritime oil spill combat ships. *Sustainability* 10 (7), 2321.
21. K Łazuga, L Gucma, M Perkovic. (2013). M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 36(108) z. 1 pp. 110–115.
22. Cihat Aşan, Burcu Özsoy, Aydın Şihmantepe, Murat Selçuk Solmaz. (2020). A case study on oil pollution in Istanbul Strait: Revisiting 1994 Nassia tanker accident by utilising Potential Incident Simulation Control and Evaluation System (PISCES-II) simulation. What would be different in terms of response if Nassia accident happened today? *Marine Pollution Bulletin*. Volume 151:110813.
23. Perkovic M., Greidanus H., Muellenhoff O., Ferraro G., Pavlakis P., Cosoli S. and Harsch R. (2010). Marine polluter identification: Backtracking with the aid of satellite imaging, *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 19, No 10b, pp 2426-2432.
24. Valery I. Reshnyak, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Nikolai St. Otdelkin. Ecological support of water tourism. *Marine intellectual technologies*. 2019. № 4 (46) V.2. p. 154-160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Степанович Наумов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru

Андрей Евгеньевич Пластинин, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: plastininae@yandex.ru

Александр Николаевич Каленков, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru

Наталья Сергеевна Родина, аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, Н.Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: rodina_n_s@mail.ru

Viktor S. Naumov, professor, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: : kaf_oospb@vsuwt.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

Aleksandr N. Kalenkov, Ph.D. (Eng), Assistant professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, 603951, N. Novgorod, st. Nesterova, 5, e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru

Natalia S. Rodina, graduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety, Volga State University of Water Transport, st. Nesterova, 5, N. Novgorod, 603951, Russian Federation, e-mail: rodina_n_s@mail.ru

Поступила в редакцию: 25.02.2021

Принята к публикации: 05.05.2021

УДК 656.6:654.9

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.017>

Новые функции мультикритериальных судовых систем пожарной сигнализации

В.Н. Круглеевский¹ e-mail: skpo@bk.ru, В.В. Вислогузов¹ e-mail: vviktor72@mail.ru,
А.А. Таранцев¹ e-mail: info@iptran.ru, С.Н. Турусов², serniktur@yandex.ru

¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Акционерное общество «Всероссийский научно исследовательский и технологический институт электромашиностроения»

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются вопросы развития пожарных извещателей, контролирующих появление дыма, превышение заданного значения температуры и скорости ее роста, наличие угарного газа и использующих мультикритериальные алгоритмы для оценки обоснованности сигналов тревоги. Анализируются результаты проведенных отечественными организациями сравнительных испытаний мультикритериальных и традиционных «пороговых» пожарных извещателей и возможности их применения на судах в составе систем пожарной сигнализации. Определено, что при повторении одних и тех же модельных очагов пожаров зафиксированные значения контролируемых параметров отличались незначительно. При этом для каждого модельного очага можно было обнаружить свои характерные черты. Сделан вывод о том, что внедрение мультикритериальных алгоритмов обработки информации в судовые системы обнаружения пожаров не только сокращает время обнаружения пожара, но и позволяет расширить функциональные возможности системы. Используя мультикритериальные пожарные извещатели в системах пожарной сигнализации можно будет распознавать, что именно горит: дизельное топливо, ветошь, изоляция электрического кабеля или что-либо другое. Отмечается, что требования к судовым мультикритериальным системам сигнализации обнаружения пожара нашли свое отражение в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: морское судно, система пожарной сигнализации, фактор пожара, мультикритериальный пожарный извещатель, мультикритериальный алгоритм, дельта-фактор, искусственная нейронная сеть, распознавание источника пожара, прогнозирование пожароопасных факторов.

New functions of multicriteria ship fire alarm systems

Vladimir N. Krugleevskiy¹ e-mail: skpo@bk.ru, Victor V. Visloguzov¹ e-mail: vviktor72@mail.ru,
Alexandr A. Tarantsev¹ e-mail: info@iptran.ru, Sergey N. Turusov² serniktur@yandex.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, ²JSCall-Russian scientific research design and Technological Institute of electrical engineering (VNITI EM), St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article discusses the development of fire detectors that control the appearance of smoke, the excess of a given temperature and the rate of its growth, the presence of carbon monoxide and use multicriteria algorithms to assess the validity of alarm signals. The results of comparative tests of multicriteria and traditional fire detectors conducted by domestic organizations and the possibility of their use on ships as part of fire alarm systems are analyzed. It was determined that when the same model fires were repeated, the recorded values of the controlled parameters differed slightly. At the same time, for each model focus, it was possible to detect its own characteristic features. It is concluded that the introduction of multicriteria algorithms for information processing in ship fire detection systems not only reduces the time of fire detection, but also allows you to expand the functionality of the system. Using multi-criteria fire detectors in fire alarm systems, it will be possible to recognize what exactly is burning: diesel fuel, rags, electrical cable insulation, or anything else. It is noted that the requirements for ship multicriteria fire detection alarm systems are reflected in the Rules for the Classification and Construction of Marine Vessels of the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: marine vessel, fire alarm system, fire factor, multicriteria fire detector, multicriteria algorithm, delta factor, artificial neural network, fire source recognition, fire hazard prediction.

Введение

Формирование решения о пожаре в судовых системах пожарной сигнализации (СПС) осуществляется на основе информации, получаемой от автоматических пожарных извещателей, которые обнаруживают опасные факторы пожара (повышение температуры, появление дыма, пламени), и так называемых «ручных пожарных извещателей» для подачи сигнала «пожар» непосредственно членом судовой команды или пассажиром.

В большинстве используемых в настоящее время судовых СПС срабатывание пожарных извещателей (ПИ) производится с использованием так называемого «порогового» принципа при достижении контролируемых параметров опасных факторов пожара (ОФП) заданных нормативных значений. Опыт эксплуатации пороговых СПС на

морских и речных судах показал, что количество ложных пожарных тревог в таких системах настолько велико, что снижает доверие к их сигналам и требует перепроверки получаемой информации. Необходимость проведения разведки района, в котором сработал пожарный извещатель, чтобы понять, что же там произошло на самом деле, значительно увеличивает время между моментом обнаружения пожара и началом действий по его локализации.

Недостаточная эффективность пороговых СПС является общей проблемой для всех производителей систем противопожарной автоматики. Поэтому ведущие производители СПС ведут поиск и разработку новых подходов к созданию СПС нового поколения.

1. Анализ развития мультикритериальных пожарных извещателей

Одним из таких подходов является применение мультисенсорных (мультикритериальных) пожарных извещателей (МПИ), представляющих собой устройство, которое содержит несколько первичных измерительных преобразователей (сенсоров), осуществляющих преобразование различных физических величин, характеризующих пожар и сопровождающих его газообразных продуктов горения, в электрический сигнал. МПИ обеспечивает самостоятельно, либо во взаимодействии с приемно-контрольным прибором формирование сигнала о пожаре на основании результатов обработки контролируемых данных по мультикритериальному алгоритму (для справки: мультикритериальный алгоритм обнаружения пожара - способ обработки сигналов, поступающих от одного или нескольких пожарных извещателей, с целью достоверной идентификации пожарной ситуации с учетом изменяющихся во времени нескольких ОФП или нескольких физических характеристик одного фактора). Конструкция МПИ идентична конструкции комбинированных пожарных извещателей.

В МПИ для обнаружения одного и того же фактора пожара могут использоваться различные первичные измерительные преобразователи. Выходной сигнал пожарного извещателя, в том числе сигнал «пожар», формируется в результате математической обработки информации, получаемой от всех первичных преобразователей и поэтому является более достоверным. Именно этим мультикритериальный дымовой извещатель с тепловым каналом, который отличается от комбинированного дымового-теплого извещателя, у которого каналы работают независимо друг от друга с формированием сигнала «Пожар» по логике «ИЛИ».

В настоящее время наиболее эффективным точечным пожарным извещателем, обеспечивающим раннее обнаружение широкого спектра очагов в различных условиях эксплуатации, считается именно мультикритериальный дымовой-тепловой-газовый СО-извещатель [1]. Причем современные технологии позволяют его реализовать в корпусе стандартных размеров. Пример опытного образца МПИ с сенсорами пламени, тепла, дыма и угарного газа представлен на рис. 1.

Одновременное использование дымового и теплового сенсоров позволяет реально сократить время обнаружения открытых очагов возгораний, что очень важно ввиду их быстрого развития. Сочетание сравнительно небольших концентраций дыма при повышении температуры окружающей среды является достоверным признаком ранней стадии горения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), пластических и других материалов, не имеющих стадии тления.

Можно считать, что МПИ во многом обязаны своим появлением решению задачи повышения помехоустойчивости и защиты от ложных срабатываний дымовых пожарных извещателей. Дымовые оптико-электронные пожарные извещатели совершенствовались по пути сокращения времени обнаружения, расширения спектра очагов загораний и повышения достоверности сигнала «Пожар».



Рис. 1 Мультисенсорный пожарный извещатель

Существенный недостаток дымового оптико-электронного извещателя – это пониженная чувствительность по дымам с мелкими частицами. Открытые очаги быстро развиваются и представляют особую опасность, причем загорание многих материалов, например, пластиков и ЛВЖ, происходит без стадии тления. Данная проблема может быть в значительной степени устранена путем дополнения информации дымового канала анализом изменения температуры во времени.

Хорошие результаты по защите от ложных срабатываний с одновременным сокращением времени обнаружения пожароопасной ситуации показывают мультисенсорные пожарные извещатели, в которых наряду с дымовым и тепловым устанавливают сенсор окиси углерода (СО) «угарного газа». Сенсор СО обеспечивает раннее обнаружение скрытых, медленно развивающихся, тлеющих очагов. При скрытом тлении углеродосодержащих материалов при ограничении доступа кислорода образуется «угарный газ» при сравнительно небольшом уровне задымления. С другой стороны, газовый сенсор СО обеспечивает хорошую защиту от ложных тревог при воздействии пара, аэрозолей, пыли и т.д. При повышении оптической плотности среды и отсутствии «угарного газа» сенсор СО позволяет идентифицировать воздействия подобных помех, не связанных с изменением пожароопасной обстановки в помещении, поскольку тлеющие очаги всегда сопровождаются образованием значительной концентрации «угарного газа».

В качестве примера можно привести дымовой пожарный извещатель с тепловым датчиком и обработкой информации в режиме High Performance Optical (HPO) [2]. Канал измерения температуры в нем используется только для расширения возможностей дымового канала, чувствительность которого изменяется в зависимости от температуры окружающей среды. Данный алгоритм обработки информации позволяет обнаруживать пламенные пожары с эффективностью радиоизотопного извещателя. Другой пример МПИ – газовый извещатель «угарного газа» с тепловым сенсором, в котором чувствительность по газовому каналу СО зависит от изменения температуры окружающей среды. Подобные алгоритмы позволяют значительно снизить вероятность ложных тревог при воздействии пара, пыли и аэрозолей.

2. Сравнительные испытания пожарных извещателей для судовых систем пожарной сигнализации

Среди российских компаний, занимающихся разработкой МПИ, следует отметить ООО «Научно-производственное объединение «Пожарная автоматика сервис» (НПО «ПАС»), проводящую

большую планомерную работу по внедрению МПИ в судовые СПС. Три крупные серии испытаний МПИ разработки и производства НПО «ПАС», которые прошли в том числе и в ФГУП «Крыловский государственный научный [3], подтвердили в среднем в два раза большую эффективность МПИ по сравнению с комбинированными пороговыми ПИ. Результаты испытаний приведены на рис.2.

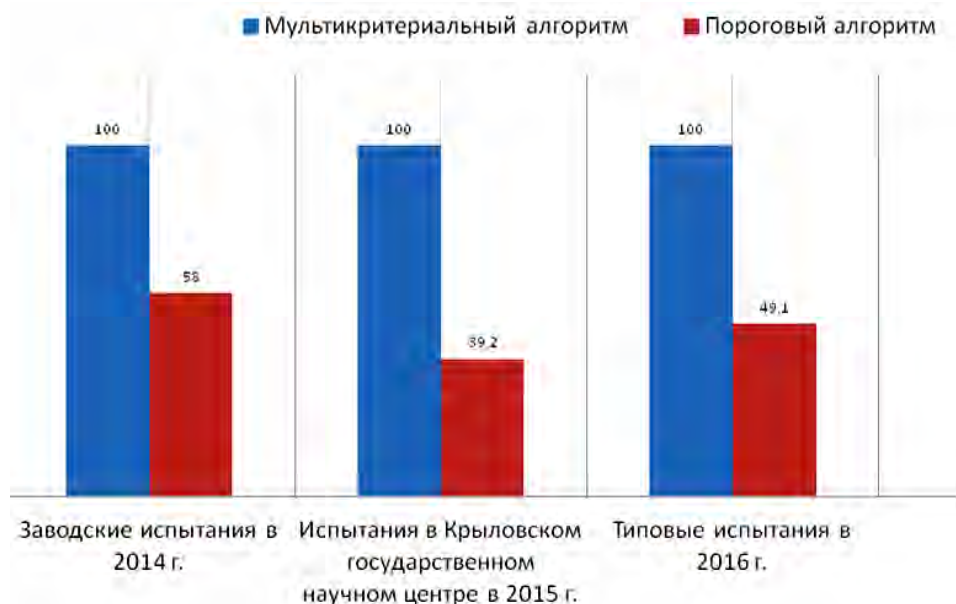


Рис.2. Сравнение эффективности мультикритериального и порогового алгоритмов обнаружения пожара

Критерием эффективности являлись факт и время обнаружения горения модельных очагов пожара по двум факторам горения. В мировой современной практике модельные очаги пожаров применяются для тестирования систем пожарной сигнализации на эффективность главным образом потому, что они имитируют пожары в начальной стадии развития. Если система обнаруживает горение модельного очага до момента прекращения его горения, то она признается эффективной. Если же система не срабатывает на модельный очаг пока идет горение, она соответственно считается не эффективной. Из двух эффективных систем та является лучшей, которая очаги горения обнаруживает раньше. При этом не важно, какие модельные очаги выбираются в качестве тестовых, так как специфика их горения и опасные факторы пожара, которые при этом себя проявляют, в одинаковой мере воздействуют на тестируемые пожарные извещатели.

Испытания показали, что мультикритериальный алгоритм обработки сигналов обеспечивал положительный эффект по сравнению с пороговым во всех случаях независимо от условий горения, назначения защищаемых помещений, наличия или отсутствия вентиляции, расположения пожарных извещателей.

Во всех проведенных испытаниях использовался жесткий алгоритм, формирующий сигнал пожарной тревоги на основе обнаружения дельта-фактора. Дельта-фактор представляет собой нормируемое изменение значения ОФП в начальной стадии развития по величине в заданный интервал времени,

когда величина фактора не достигла опасных значений. При этом ОФП, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) материальному ущербу, принято считать: пламя и искры; тепловой поток; повышенную температуру окружающей среды, повышенную концентрацию токсичных продуктов горения и термического разложения, пониженную концентрацию кислорода, снижение видимости в дыму. Обнаружение дельта-фактора автоматически фиксировалось приемно-контрольным прибором при выполнении следующего условия:

$$\Delta\Phi \leq \Phi_2 - \Phi_1,$$

где: $\Delta\Phi$ — дельта фактор;

Φ_2 — текущее значение дельта-фактора;

Φ_1 — ретроспективное значение дельта-фактора, имевшего место в начале заданного интервала времени, относительно текущего значения.

Использовались следующие нормативные значения дельта-фактора:

по температуре 5 °С;

по дыму 0,5 % на 1 м;

по «угарному газу» 10 млн⁻¹.

Заданный интервал времени равнялся 15 минутам.

3. Расширение функциональных возможностей судовых систем пожарной сигнализации при использовании МПИ

Во время испытаний на дисплее приемно-контрольного устройства было организовано наглядное представление контролируемых

параметров (дым, температура, «угарный газ»), что позволило увидеть определенную закономерность. Для разных модельных очагов значения параметров, зафиксированных в момент срабатывания МПИ, явно отличались. При повторении одних и тех же модельных очагов пожаров зафиксированные значения параметров отличались незначительно. При этом для каждого модельного очага можно было обнаружить свои характерные черты. Примеры зафиксированных значений контролируемых

параметров в момент обнаружения пожара МПИ показаны на рис. 3.

Выявленная закономерность позволяет реализовать в судовых СПС новую функцию «распознавание источника пожара».

Действительно, в судовых помещениях возможно возгорание различного вида горючей нагрузки: топлива, масел, ветоши, изоляции кабельных линий электроэнергетической системы и т.п.

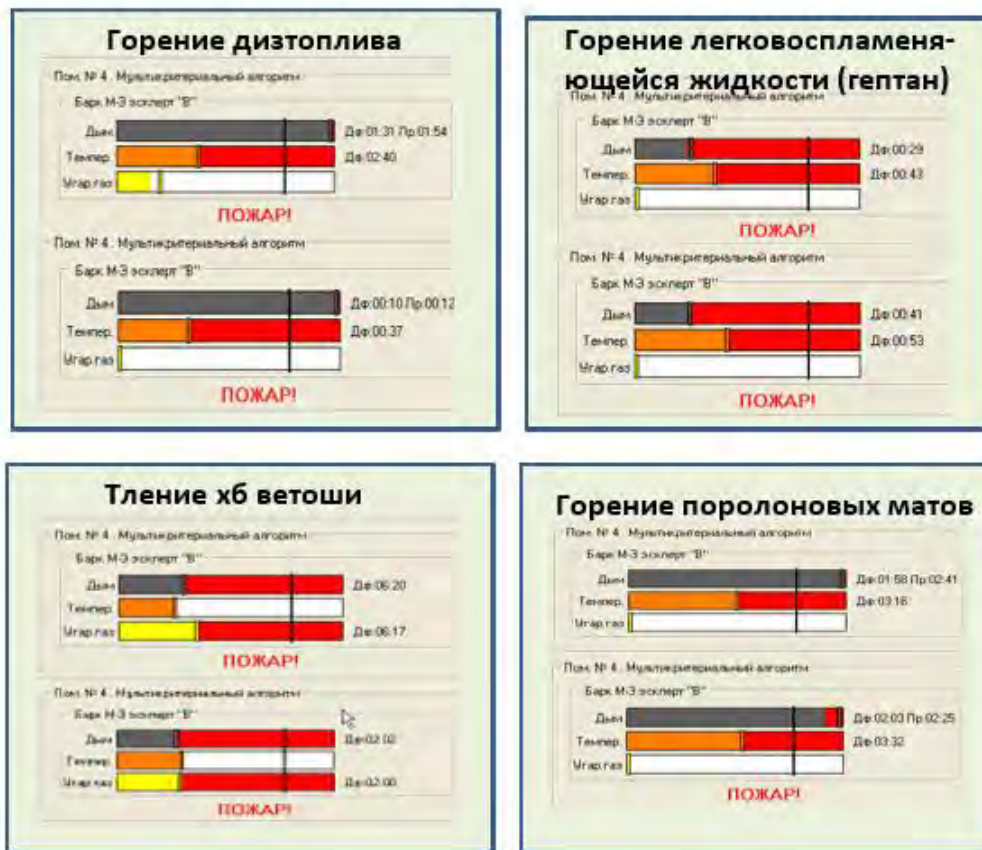


Рис. 3. Значения контролируемых параметров в момент обнаружения пожара мультикритериальным пожарным извещателем

В то же время, для конкретного помещения количество вероятных источников пожара невелико и в большинстве случаев не превышает 5-7 вариантов, поэтому для судовых помещений различного назначения можно заранее определить присутствие только им множества возможных источников пожара. Также опытным путем, используя результаты экспериментов по срабатывания МПИ при горении различных материалов, являющихся источниками пожаров в судовых помещениях, можно определить диапазоны значений контролируемых параметров, характерных для этих материалов. Далее, путем сравнения значений контролируемых параметров, зафиксированных при срабатывании пожарных извещателей, с полученными ранее диапазонами значений судовая СПС будет способна определить что горит.

Распознавание источника пожара из множества возможных фактически является задачей классификации образов. Механизм классификации образов можно выразить на языке отображения пространства признаков (в рассматриваемом случае

это значения параметров, контролируемых МПИ) в пространство решений (возможные источники пожаров).

Каждый входной образ характеризуется N признаками (численными значениями температуры воздушной среды, «угарного газа», задымленности), а каждое множество из N признаков можно рассматривать как вектор X , называемый вектором признаков, или как точку в N -мерном пространстве признаков Ω_X .

Задача классификации заключается в распределении всех возможных векторов или точек в пространстве признаков Ω_X по соответствующим классам образов. Это можно трактовать как разбиение пространства признаков на взаимно непересекающиеся области, каждая из которых соответствует некоторому классу образов.

Математически задача классификации формулируется с помощью разделяющей функции.

Пусть $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ обозначают m (как было сказано

выше $m \leq 7$) возможных классов образов (источников пожара), подлежащих распознаванию, и пусть:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}$$

есть вектор замеров признаков, где x_i представляет собой i -й замер. Тогда разделяющая функция $D_j(X)$, относящаяся к классу образов $\omega_j, j = 1, \dots, m$, такова, что если входной образ, представленный вектором признаков X , принадлежит классу ω_i , то величина $D_i(X)$ должна быть наибольшей. Пусть $X \sim \omega_i$ обозначает, что вектор признаков X входного образа принадлежит классу ω_i .

Тогда можно записать, что для всех $X \sim \omega_i$:

$$D_i(X) > D_j(X), i, j = 1, \dots, m, i \neq j.$$

Таким образом, в пространстве признаков Ω граница разбиений, называемая решающей границей, между областями, относящимися соответственно к классу ω_i и классу ω_j , выражается уравнением

$$D_i(X) - D_j(X) = 0.$$

Использование мультикритериальных алгоритмов обработки сигналов в судовых СПС не только сокращает время обнаружения пожара, но также расширяет функциональные возможности системы. Дополнительная информация наряду с сигналом «Пожар» о том, что именно горит: дизельное топливо, ветошь, изоляция электрического кабеля или что-либо другое, — чрезвычайно важна для быстрого принятия правильного решения по локализации очага возгорания.

Задачу распознавания источника пожара можно реализовать с использованием искусственной нейронной сети. В предложенном варианте устройства определения источника возгорания [4] МПИ был дополнен нейронным классификатором, формирующим сигнал о типе источника пожара.

Применение искусственных нейронных сетей для обработки информации в мультикритериальных системах сигнализации (МСС) обнаружения пожара позволяет реализовать не только функцию распознавания, но и прогнозирования пожарной опасности.

Так уже в 2015 г. в работе [5] была предложена искусственная нейронная сеть на основе перцептрона для прогнозирования численных значений факторов, вызывающих пожароопасные ситуации, которая позволяла осуществлять их прогнозирование на интервалы времени, достаточные для принятия мер по предотвращению пожара. Прогнозирование осуществлялось в связке с системой нечеткого вывода, использующей базу знаний по обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях. При этом удалось избежать чрезмерно большого объема вычислений,

что было очень важно для дальнейшего использования данной разработки в системах информационной поддержки в режиме реального времени.

4. Требования к судовым мультикритериальным системам сигнализации обнаружения пожара

Как результат проделанной НПО «ПАС» работы, разработанный проект требований к судовым мультикритериальным СПС нашел свое отражение в Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (РМРС). Впервые в разделе «Системы пожарной сигнализации» представлены определения опасных факторов пожара, дельта-фактора, МПИ, МСС обнаружения пожара, мультикритериального алгоритма обнаружения пожара.

МСС и обнаружения пожара могут функционировать в соответствии с жестким и выбираемым алгоритмом. Способ обработки сигналов в виде жесткого алгоритма не зависит от категории защищаемых судовых помещений и класса потенциального пожара и может рассматриваться как универсальный. В отличие от жесткого алгоритма, выбираемый алгоритм зависит от категории защищаемого помещения и класса потенциального пожара. При этом каждый выбранный алгоритм обработки сигналов может быть применен исключительно к конкретным категориям помещений.

МСС должна автоматически формировать сигнал пожарной тревоги и блокировать ложные срабатывания, вызванные не ОФП, при помощи алгоритма обработки изменяющихся во времени сигналов, принимаемых от находящихся в одном помещении или зоне пожарных извещателей.

Требования к судовым МСС обнаружения пожара введены в действие с 15.04.2021 г. [6].

Заключение

Несмотря на то, что МПИ начали создаваться более десяти лет назад, МСС и обнаружения пожара все еще находятся на своем начальном этапе развития. Естественно, что найти какие-либо публикации об опыте их использования на судах пока не представляется возможным.

В 2021 г. требования к судовым МСС обнаружения пожара впервые были введены в Правила классификации и постройки морских судов РМРС.

Российскими разработчиками судовых СПС с целью исследования эффективности МПИ и сравнения их характеристик с выпускаемыми в настоящее время пожарными извещателями, срабатывающими при превышении установленных значений контролируемых параметров, были проведены несколько серий испытаний на различных очагах пожара. МПИ показали значительно более высокую эффективность. Предложенный к широкому использованию в пожарных извещателях мультикритериальный алгоритм обнаружения пожара позволил практически вдвое сократить время реагирования СПС на появление ОФП. Более того, анализ полученных результатов испытаний позволил увидеть ряд закономерностей и выдвинуть идею о том, что в мультикритериальных системах обнаружения пожара может быть реализована

функция распознавания источника возгорания из заранее определенного множества возможных характерных для конкретного вида судового помещения (жилого, административного, кладовой, машинного отделения, грузового трюма и т.д.).

Данная идея была изложена в патенте на изобретение «Судовое устройство определения источника возгорания мультикритериальным извещателем с использованием нейронного классификатора» [4].

Литература

1. Неплохов И.Г. Пожарные извещатели. Термины, определения, принцип действия. Каталог ОПС. Охранная и охранно-пожарная сигнализация. Периметральные системы. 2013г.
2. Скорфилд С. Мультисенсор – эффективное решение проблемы ложных срабатываний систем пожарной сигнализации. // Системы безопасности № 5, 2006 г.
3. Экзамен на эффективность. //Морской бизнес северо-запада № 3 (44), 2016 г., с. 34-35.
4. Судовое устройство определения источника возгорания мультикритериальным извещателем с использованием нейронного классификатора // Патент № 198734 РФ 24.07.2020.
5. Тупиков Д.В. Модели и алгоритмы поддержки принятия решений по обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях // Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Саратовский ГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2015 г.
6. Российский морской регистр судоходства. Циркулярное письмо № 313-14-1519ц от 10.03.2021 г. Изменения к Правилам классификации и постройки морских судов, 2021, НД № 2-020101-138.

References

1. Nedorokhov I. G. Fire detectors. Terms, definitions, and operating principle. The OPS catalog. Security and fire alarm systems. Perimeter systems. 2013.
2. Skorfield S. Multisensor-an effective solution to the problem of false alarms of fire alarm systems. // Security systems No. 5, 2006
3. 3. Performance test. //Marine business of the North-West No. 3 (44), 2016, pp. 34-35.
4. Ship device for determining the source of ignition by a multicriteria detector using a neural classifier // Patent No. 198734 of the Russian Federation 24.07.2020.
5. Tupikov D. V. Models and algorithms for decision support for fire safety in industrial enterprises // Dissertation for the academic degree. Candidate of Technical Sciences. Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin, 2015
6. Russian Maritime Register of Shipping. Circular letter No. 313-14-1519c of 10.03.2021. Amendments to the Rules of Classification and Construction of Marine Vessels, 2021, ND No. 2-020101-138.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Николаевич Круглеевский, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: skpo@bk.ru

Vladimir N. Krugleevsky, Dr. Sci. (Eng), Leading Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: skpo@bk.ru

Виктор Викторович Вислогузов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: vvviktor72@mail.ru

Victor V. Visloguzov, Ph.D. (Eng), Leading Researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: vvviktor72@mail.ru

Александр Алексеевич Таранцев, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН «Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко» Российской академии наук (ИПТ РАН), 199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13; e-mail: info@iptran.ru

Alexander A. Tarantsev, Professor, Dr. Sci. (Eng), Head of Laboratory of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: info@iptran.ru

Сергей Николаевич Турусов, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт электромашиностроения» (ВНИТИ ЭМ), 196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 2, e-mail: serniktur@yandex.ru

Sergey N. Turusov, professor, Dr. Sci. (Eng), General Director, JSCall-Russian scientific research design and Technological Institute of electrical engineering (VNITI EM), 2, Blagodatnayast., St. Petersburg, 196128, Russia, e-mail: serniktur@yandex.ru

Поступила в редакцию: 12.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

УДК 621.391.26, 004.627, 932.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.018>

Потоковая обработка видеoinформации морских сюжетов с использованием расширенной инструкции процессора

Ш.С. Фахми^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, Н.В. Шаталова¹ e-mail: shatillen@mail.ru,
Е.В. Костикова³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Аннотация. Современные полупроводниковые технологии позволяют перейти к более развитым системам видеонаблюдения, где преобразование и обработка видеoinформации выполняются непосредственно на этапе съемки и формирования видеопотока. Умные камеры расширяют функциональность встроенных видеосенсоров, обеспечивая параллельную высокоуровневую обработку видео. В предлагаемом исследовании проведена разработка адаптивных алгоритмов спектрального преобразования изображений морских сюжетов, позволяющие решить необходимые задачи в реальном времени. Актуальным становится решение задачи использования современных процессорных технологий с использованием последних достижений в архитектуре процессорного ядра, в частности расширенные SSE-инструкции. Рассмотрен математический аппарат реализации адаптивных алгоритмов дискретного косинусного преобразования на базе SSE архитектуры процессорного ядра. Предложенные алгоритмы динамически выполняют предварительный анализ движения и определяют оптимальные размеры видеокубов. Для оценки эффективности предложенных алгоритмов сжатия было использовано множество различных изображений морских судов, полученных с камер и расположенных на беспилотниках с высоты 100-400м. Показаны результаты моделирования предложенных алгоритмов обработки видеoinформации морских сюжетов и определены количественные оценки информационных показателей качества видеосистем кодирования и декодирования изображений.

Ключевые слова: видеосистема, кодирование, декодирование, морские сюжеты, SSE процессор, косинусное преобразование, процессорное ядро, квантование.

Streaming video processing of marine scenes using advanced processor instructions

Shakeeb S. Fahmi^{1,2} e-mail: shakeebf@mail.ru, Natalia V. Shatalova¹ e-mail: shatillen@mail.ru,
Elena V. Kostikova³ e-mail: kostikova.ev@mail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, ³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St.Petersburg, Russian Federation

Abstract. Modern semiconductor technologies allow us to move to more advanced video surveillance systems, where the transformation and processing of video information is performed directly at the stage of shooting and forming a video stream. Smart cameras even extend the functionality of the built-in video sensors, providing parallel high-level video processing. In the proposed study, adaptive algorithms for spectral transformation of images of marine plots were developed, which allow solving the necessary problems in real time. The solution of the problem of using modern processor technologies using the latest achievements in the architecture of the processor core, in particular, advanced SSE instructions, becomes relevant. The mathematical apparatus for implementing adaptive algorithms for discrete cosine transformation based on the SSE architecture of the processor core is considered. Proposed algorithms dynamically perform preliminary motion analysis and determine optimal dimensions of video cubes. To evaluate the effectiveness of the proposed compression algorithms, many different images of naval vessels obtained from cameras and located on drones from a height of 100-400m were used. The results of modeling the proposed algorithms for processing video information of marine scenes are shown and quantitative estimates of information quality indicators of video systems for encoding and decoding images are determined.

Keywords: video system, encoding, decoding, sea scenes, SSE processor, cosine transform, processor core, quantization.

Введение

Весь мир переживает большие информационные изменения, проводимые путем перестройки и переосмысления технологических процессов. Стремительный рост информационных технологий, в частности видеoinформационных систем, привел к активному внедрению современных технологий обработки видеoinформации для решения проблем передачи и обеспечения:

- безопасности во всех сферах жизнедеятельности человека;

- оперативной и высококачественной доставки видеопотока в реальном времени;

- кодирования и декодирования видеoinформации с учетом пропускной способности канала связи.

Помимо вышеупомянутых (общемировых) проблем, современные требования цифровой эры способствуют реструктуризации информационных систем и вынуждают органы принятия решений прибегнуть к более креативным новым стратегиям передачи и применения видеoinформации, отвечающим острым вызовам обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях (ЧС). В

дополнение к преимуществам (например, минимальное время для приёма и передачи изображений морских сюжетов непосредственно на этапе съёмки и оперативная её доставка в соответствующие центры принятия решений).

Технологии наблюдения продвинули вперед обработку видео и внедрение спектральных алгоритмов преобразования в сложных динамических транспортных системах. Но исследования в области высококачественной доставки видеоинформации для обеспечения контроля и безопасности морского судоходства все еще находятся в зачаточном состоянии, и некоторые задачи оперативной передачи информации остаются нерешёнными в данной области [1,2].

1. Постановка задачи исследования

Спектральные алгоритмы передачи видеоинформации, полученной из различных камер наблюдения за морскими судами, представляющий собой единственный инструмент, позволяющий сократить избыточность визуальных данных с минимальными вычислительными затратами при сохранении качества с заданной точностью. Наибольшее распространение получили спектральные преобразования на основе косинусной функции, характеризующейся четностью, симметричностью и непрерывностью.

Метод сжатия изображения достигается с помощью статистического вывода из значений пикселей изображения. Существует значительная статистическая избыточность в каждом наблюдаемом изображении. Следовательно, техника сжатия изображений играет значительную роль в минимизации затрат и пропускной способности на цифровой арене.

Дискретное косинусное преобразование (ДКП) используется из-за его энергетических характеристик уплотнения. ДКП имеет четную функцию, которую легче вычислить, и число коэффициентов становится меньше при анализе и учете корреляционных свойств сигнала изображений. Таким образом, ДКП может привести к более точной реконструкции изображения. Даже в его основе известного стандарта JPEG лежит ДКП и часто на практике применяется при сжатии изображений с потерями. Существует важнейший этап в процессе передачи больших объемов визуальных данных, называемый квантованием. На этом этапе менее важные пиксели отбрасываются в соответствии с частотным распределением исходного сигнала. Оставшиеся пиксели образуют сжатое изображение. Так, некоторые искажения могут появляться в результате квантования, но уровень искажения можно регулировать путём различной манипуляции с матрицей квантования [7].

Матрицы квантования формируются в результате ДКП над блоками исходного изображения размером 8x8 пикселей. А для случая видеопотока также на начальном этапе последовательность изображений группируются по восемь кадров для формирования кубов размером 8x8x8 (рис. 1). Эти кубы далее подвергаются трехмерному ДКП.

Поскольку видеоинформация представляет собой потоки данных большого размера и разного формата, то целесообразно использовать расширенные возможности архитектуры процессора

с независимыми блоками из восьми 128-битных регистров ХММ0-ХММ7 [3,4]. Таким образом, сжатие видеопотока осуществляется выполнением ДКП в пространстве сигнала и по времени с использованием языка высокого уровня, что позволяет достичь высокой производительности.

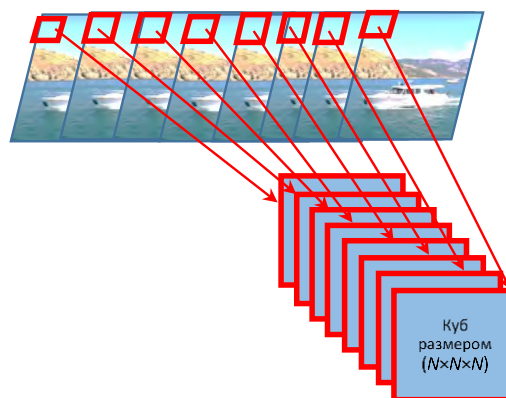


Рис. 1. Выделение куба из последовательности изображений морских судов для выполнения ДКП

В данной статье приводится решение следующих задач:

- исследования и разработки адаптивных алгоритмов спектрального преобразования изображений морских сюжетов, позволяющие решить выше указанные задачи в реальном времени;
- эффективное применение особенности архитектуры процессора SSE;
- разработка математического аппарата преобразования изображений морских сюжетов с использованием расширений SSE для класса вычислительных систем типа одиночный поток команд-множественный поток данных (single instruction, multiple data - SIMD), (Streaming SIMD Extension) и SSE2 Intel-совместимых процессоров

2. Описание предложенных алгоритмов

Предлагаемые алгоритмы реализуются с использованием языка описания аппаратного обеспечения VHDL в структурном формате и следует оптимальным советам программирования, с помощью которых достигается низкая загрузка аппаратных ресурсов, низкая задержка, высокая пропускная способность и высокая тактовая частота.

Алгоритмы трехмерного кодирования видеоинформации ДКП-3D основаны на использовании трехмерного дискретного косинусного преобразования (ДКП, ДКП) для сокращения избыточности изображения. Использование такого преобразования позволяет осуществить сокращение избыточности не только в пространственном, но также и во временном направлении, что оказывается возможным благодаря тому обстоятельству, что соседние кадры большинства реальных видеопоследовательностей сильно коррелированы и потому связаны друг с другом. Например, в видеопоследовательности, не содержащей движения, все кадры равны друг другу (с точностью до шумовой составляющей, которая неминуемо присутствует в каждом кадре последовательности).

Общепринятые методы кодирования движущихся изображений также используют ДКП для устранения избыточности в изображении, но делают это только в

пространственном направлении, применяя для устранения временной избыточности другие методы, что обуславливает их высокую вычислительную сложность и малое быстродействие, особенно при кодировании.

Кадры исходной видеопоследовательности разделяются на группы по 8 кадров. Каждая группа из 8 кадров считается трехмерным изображением. Каждая группа кадров делится на блоки размером 8x8x8, образуя кубы данных (рис. 1).

Каждый куб данных подвергается трехмерному косинусному преобразованию, выходные коэффициенты которого квантуются и после этого сжимаются энтропийным кодером без потерь. Выходные данные энтропийного кодера вместе со служебной информацией записываются в битовый поток.

С целью предотвращения временных искажений на резких сменах сюжета, размер группы кадров по временной оси может изменяться от 1 до 8 кадров.

Рассмотрим основные этапы потоковой обработки морских сюжетов.

2.1 Начальная подготовка видеопотока

Кодирование и декодирование морских сюжетов включает следующие процедуры:

1. Преобразование входных видеоданных.

Входные видеоданные каждого кадра в формате Y0-Y3 (DirectShow аналог телевизионного формата 4:2:2) разбиваются на отдельные плоскости Y, U и V (рис. 2). Для плоскостей цветностной информации U и V производится уменьшение разрешения по вертикали в 2 раза путем усреднения соседних строк изображения (рис. 2).

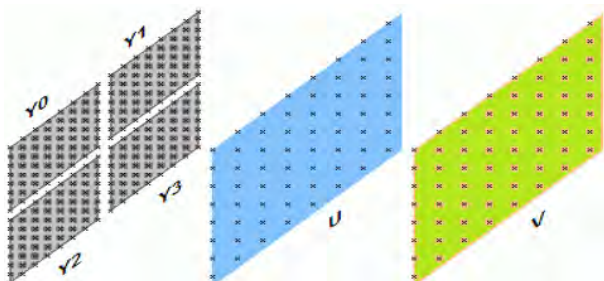


Рис. 2. Формат основных компонентов изображения

2. Накопление кадров.

Разбитые на плоскости исходные кадры накапливаются в буфере до тех пор, пока число накопленных кадров не достигнет заданной величины глубины группы кадров.

3. Разбиение на кубы видеоданных.

Накопленная группа кадров разбивается на кубы размером 8x8xN, где N – число кадров в группе. Разбиение производится отдельно для плоскостей Y, U и V.

4. Разбиение на макроблоки.

Макроблок представляет собой набор из 6 кубов видеоданных. Из них 4 являются кубами яркостной составляющей. Оставшиеся два куба представляют собой кубы из плоскостей U и V, геометрически

соответствующие этим четырем кубам яркостной составляющей.

5. Трехмерное дискретное косинусное преобразование.

Трехмерное ДКП осуществляется над каждым блоком видеоданных с использованием 32-битных чисел с плавающей точкой. С целью ускорения алгоритма, все вычисления производятся с помощью расширенной инструкции SSE и SSE2 Intel-совместимых процессоров, позволяющих за одну команду процессора одновременно обработать до четырех чисел типа float.

Для выполнения трехмерного ДКП производится его разбиение на три одномерных ДКП:

а) в первом проходе осуществляется одномерное ДКП по оси X для всех строк куба;

б) во втором проходе производится одномерное ДКП по оси Y для всех столбцов куба над полученными коэффициентами предыдущего шага;

в) в третьем проходе осуществляется одномерное ДКП по оси Z.

В том случае, если глубина куба не равна 8, производится соответствующая корректировка размерности последнего ДКП по оси Z, а также изменяется количество строк и столбцов, над которыми производятся вычисления ДКП по осям X и Y соответственно [5,6].

2.2. Кодирование и выполнение ДКП

1) Одномерное ДКП размером 8. Одномерное ДКП размером 8 производится по следующим формулам:

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{8}}, K_1 = \frac{1}{2},$$

$$s_{07} = f_0 + f_7 \quad s_{16} = f_1 + f_6 \quad s_{25} = f_2 + f_5 \quad s_{34} = f_3 + f_4$$

$$d_{07} = f_0 - f_7 \quad d_{16} = f_1 - f_6 \quad d_{25} = f_2 - f_5 \quad d_{34} = f_3 - f_4$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{07} * K_0 * + C_0 + s_{16} * K_0 * + C_0 + s_{25} * K_0 * + C_0 + s_{34} * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{07} * K_1 * + C_1 + d_{16} * K_1 * + C_3 + d_{25} * K_1 * + C_5 + d_{34} * K_1 * + C_7$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{07} * K_1 * + C_2 + s_{16} * K_1 * + C_6 + s_{25} * K_1 * - C_6 + s_{34} * K_1 * - C_2$$

$$\text{ДКП (3)} = d_{07} * K_1 * + C_3 + d_{16} * K_1 * - C_7 + d_{25} * K_1 * - C_1 + d_{34} * K_1 * - C_5$$

$$\text{ДКП (4)} = s_{07} * K_1 * + C_4 + s_{16} * K_1 * - C_4 + s_{25} * K_1 * - C_4 + s_{34} * K_1 * + C_4$$

$$\text{ДКП (5)} = d_{07} * K_1 * + C_5 + d_{16} * K_1 * - C_1 + d_{25} * K_1 * + C_7 + d_{34} * K_1 * + C_3$$

$$\text{ДКП (6)} = s_{07} * K_1 * + C_6 + s_{16} * K_1 * - C_2 + s_{25} * K_1 * + C_2 + s_{34} * K_1 * - C_6$$

$$\text{ДКП (7)} = d_{07} * K_1 * + C_7 + d_{16} * K_1 * - C_5 + d_{25} * K_1 * + C_3 + d_{34} * K_1 * - C_1$$

Здесь $f_0...f_7$ – исходные отсчеты, K_0, K_1 – масштабирующие коэффициенты, s_{xy}, d_{xy} – промежуточные суммы и разности коэффициентов, $C_x = \cos(\pi x / 16)$, ДКП (0)...ДКП (7) – выходные коэффициенты.

После вычисления промежуточных сумм и разностей, алгоритм расчета учитывает особенности архитектуры SSE (Streaming SIMD Extensions) и ведется группами по 4 коэффициента следующим образом:

Операция	SSE (3)	SSE (2)	SSE (1)	SSE (0)	Глубина стека
	-	-	-	-	0
загрузка	d ₀₇	s ₀₇	d ₀₇	s ₀₇	1
загрузка	K ₁ *+C ₃	K ₁ *+C ₂	K ₁ *+C ₁	K ₀ *+C ₀	2
*	x ₃	x ₂	x ₁	x ₀	1
загрузка	d ₁₆	s ₁₆	d ₁₆	s ₁₆	2
загрузка	K ₁ *-C ₇	K ₁ *+C ₆	K ₁ *+C ₃	K ₀ *+C ₀	3
*	y ₃	y ₂	y ₁	y ₀	2
+	z ₃	z ₂	z ₁	z ₀	1
загрузка	d ₂₅	s ₂₅	d ₂₅	s ₂₅	2
загрузка	K ₁ *-C ₁	K ₁ *-C ₆	K ₁ *+C ₅	K ₀ *+C ₀	3
*	v ₃	v ₂	v ₁	v ₀	2
+	w ₃	w ₂	w ₁	w ₀	1
загрузка	d ₃₄	s ₃₄	d ₃₄	s ₃₄	2
загрузка	K ₁ *-C ₅	K ₁ *-C ₂	K ₁ *+C ₇	K ₁ *+C ₀	3
*	t ₃	t ₂	t ₁	t ₀	2
+	ДКП (3)	ДКП (2)	ДКП (1)	ДКП (0)	1
выгрузка	-	-	-	-	0

Приведенную таблицу следует рассматривать как схему работы параллельной стековой машины, в которой операция “загрузка” помещает заданные числа на вершину стека, операции “*” и “+” производят соответствующие действия над двумя числами на вершине стека, вынимая их из стека и замещая их результатами вычислений, а операция “выгрузка” вынимает вычисленное значение с вершины стека и помещает его в память.

В действительности в качестве стековой машины используется блок произвольно адресуемых регистров ХММ0-ХММ7 архитектуры SSE [7,8].

Вычисление коэффициентов ДКП(4)...ДКП(7) производится аналогичным образом.

Все константы, требуемые для вычислений, рассчитаны заранее и располагаются в памяти программ, сводя занимающие большое время расчеты значений функции cos() и умножение их на коэффициенты практически к нулю.

Таким образом, за счет использования параллельной структуры архитектуры SSE, позволяющей проводить до четырех операций над числами с плавающей точкой одновременно и соответственного распараллеливания алгоритма, для расчета одномерного ДКП размером 8 требуется всего лишь 8 операций умножения и 6 операций сложения, кроме того необходимы еще одна операция сложения и операция вычитания для расчета промежуточных сумм и разностей [9,10].

2) Одномерное ДКП размером 7.

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{7}}; K_1 = \sqrt{\frac{2}{7}}$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{06} * K_0 * + C_0 + s_{15} * K_0 * + C_0 + s_{24} * K_0 * + C_0 + f_3 * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{06} * K_1 * + C_1 + d_{15} * K_1 * + C_3 + d_{24} * K_1 * + C_5 + f_3 * K_1 * + C_7$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{06} * K_1 * + C_2 + s_{15} * K_1 * + C_6 + s_{24} * K_1 * - C_4 + f_3 * K_1 * - C_0$$

$$\text{ДКП (3)} = d_{06} * K_1 * + C_3 + d_{15} * K_1 * - C_5 + d_{24} * K_1 * - C_1 + f_3 * K_1 * - C_7$$

$$\text{ДКП (4)} = s_{06} * K_1 * + C_4 + s_{15} * K_1 * - C_2 + s_{24} * K_1 * - C_6 + f_3 * K_1 * + C_0$$

$$\text{ДКП (5)} = d_{06} * K_1 * + C_5 + d_{15} * K_1 * - C_1 + d_{24} * K_1 * + C_3 + f_3 * K_1 * + C_7$$

$$\text{ДКП (6)} = s_{06} * K_1 * + C_6 + s_{15} * K_1 * - C_4 + s_{24} * K_1 * + C_2 + f_3 * K_1 * - C_0$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 14)$.

3) Одномерное ДКП размером 6.

$$L_0 = \frac{1}{\sqrt{6}}; d_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{05} * d_0 * + C_0 + s_{14} * L_0 * + C_0 + s_{23} * d_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{05} * d_1 * + C_1 + d_{14} * L_1 * + C_3 + d_{23} * d_1 * + C_5$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{05} * K_1 * + C_2 + d_{14} * K_1 * + C_6 + s_{23} * K_1 * - C_2$$

$$\text{ДКП (3)} = d_{05} * K_1 * + C_3 + d_{14} * K_1 * - C_3 + d_{23} * K_1 * - C_3$$

$$\text{ДКП (4)} = s_{05} * K_1 * + C_4 + s_{14} * K_1 * - C_0 + s_{23} * K_1 * + C_4$$

$$\text{ДКП (5)} = d_{05} * K_1 * + C_5 + d_{14} * K_1 * - C_3 + d_{23} * K_1 * + C_1$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 12)$.

4) Одномерное ДКП размером 5.

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{5/4}}; K_1 = \sqrt{\frac{2}{5}}$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{04} * K_0 * + C_0 + s_{13} * K_0 * + C_0 + f_2 * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{04} * K_1 * + C_1 + d_{13} * K_1 * + C_3 + f_2 * K_1 * + C_5$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{04} * K_1 * + C_2 + s_{13} * K_1 * - C_4 + f_2 * K_1 * - C_0$$

$$\text{ДКП (3)} = d_{04} * K_1 * + C_3 + d_{13} * K_1 * - C_1 + f_2 * K_1 * - C_5$$

$$\text{ДКП (4)} = s_{04} * K_1 * + C_4 + s_{13} * K_1 * - C_2 + f_2 * K_1 * + C_0$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 10)$.

5) Одномерное ДКП размером 4.

$$K_0 = \frac{1}{2}; K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{03} * K_0 * + C_0 + s_{12} * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{03} * K_1 * + C_1 + d_{12} * K_1 * + C_3$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{03} * K_1 * + C_2 + s_{12} * K_1 * - C_2$$

$$\text{ДКП (3)} = d_{03} * K_1 * + C_3 + d_{12} * K_1 * - C_1$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 8)$.

6) Одномерное ДКП размером 3.

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}; K_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{02} * K_0 * + C_0 + f_1 * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{02} * K_1 * + C_1 + f_1 * K_1 * + C_3$$

$$\text{ДКП (2)} = s_{02} * K_1 * + C_2 + f_1 * K_1 * - C_0$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 6)$.

7) Одномерное ДКП размером 2.

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}; K_1 = 1;$$

$$\text{ДКП (0)} = s_{01} * K_0 * + C_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{01} * K_1 * + C_1$$

где $C_x = \cos(\pi * x / 4)$.

В данном случае, учитывая конкретные значения констант и тот факт, что $\cos(\pi/4) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, формула расчета может быть дополнительно упрощена:

$$\text{ДКП (0)} = s_{01} * K_0$$

$$\text{ДКП (1)} = d_{01} * K_0$$

2.3. Квантование коэффициентов ДКП

Квантование выходных коэффициентов ДКП осуществляется в соответствии со следующей формулой:

$$Q(x, y, z) = Q * (1 + (x+1)(px/10) + (y+1)(py/10) + (z+1) m(pz/10)) / 4,$$

являющейся вариантом формулы, предложенной в работе [11]

Здесь x, y, z – координаты внутри трехмерного блока коэффициентов ДКП; $Q(x, y, z)$ – коэффициент квантования для отсчета трехмерного ДКП(x, y, z); Q, px, py, pz – параметры квантования.

Диапазон изменения переменных формулы указан в следующей таблице:

Переменная	Минимум	Максимум
x	0	7
y	0	7
z	0	0 ... 7
Q	1	256
px	0	63
py	0	63
pz	0	63

Диапазон изменения координаты z зависит от текущей глубины кадров в трехмерном блоке.

Все параметры квантования представляют собой целые беззнаковые числа. При этом все расчеты коэффициентов квантования производятся с плавающей точкой и значения $Q(x, y, z)$ и являются числами с плавающей точкой. Величина Q представляет собой общий множитель для всех коэффициентов квантования, в то время как величины p_x , p_y и p_z определяют степень подавления высокочастотных коэффициентов ДКП по осям x, y и z соответственно.

Нетрудно видеть, что в силу выбранного диапазона изменения координат x, y и z, значение $Q(0, 0, 0)$ равно Q. В том случае, если величины p_x , p_y и p_z равны нулю, то для любого значения x, y, z выполняется равенство $Q(x, y, z) = Q$. Максимально возможное значение коэффициента квантования при выбранном диапазоне изменения параметров квантования и глубине куба, равной 8, составляет порядка 107.

Собственно операция квантования: $ДКП'(x, y, z) = ДКП(x, y, z) / Q(x, y, z)$ также осуществляется с плавающей точкой с той лишь разницей, что вычислительно сложная и медленная операция деления заменена умножением на обратную величину: $Q'(x, y, z) = 1 / Q(x, y, z)$.

$$ДКП'(x, y, z) = ДКП(x, y, z) * Q'(x, y, z)$$

При этом достигается существенная экономия времени в работе реального алгоритма, поскольку дорогостоящая операция деления выполняется только один раз при расчете блока коэффициентов квантования $Q'(x, y, z)$ при изменении параметров квантования.

Кроме того, значения $(p_n/10)n$ рассчитываются однократно для всех допустимых значений p_n и n и запоминаются в таблице для последующего использования.

Окончательный расчет коэффициентов квантования, равно как и сама операция квантования, осуществляются с использованием технологии SSE с одновременным параллельным вычислением четырех коэффициентов за одну команду.

Квантованные коэффициенты блока далее преобразуются в целочисленные значения со знаком методом усечения значения с плавающей точкой к нулю. Максимальное количество бит для полученных целочисленных коэффициентов (с учетом знакового бита) составляет 13.

Полученные таким образом коэффициенты располагаются в том же порядке, что и исходные ДКП коэффициенты.

2.4. Zig-zag сканирование

Zig-zag сканирование служит для перегруппирования квантованных коэффициентов таким образом, чтобы получить длинные серии

нулевых коэффициентов. Исходя из тех соображений, что для реальных изображений значение квантованного коэффициента тем больше, чем ближе он к вершине куба с координатами (0, 0, 0), был применен такой метод сканирования, при котором весь куб $8 \times 8 \times 8$ рассекается 21 параллельными диагональными плоскостями (рис. 3а), отстоящими все далее и далее от вершины куба (0, 0, 0).

Полученные треугольные (или шестиугольные, в зависимости от удаленности текущей секущей плоскости от вершины куба) сечения куба сканируются по отдельности в порядке слева направо, сверху вниз (рис. 3б):

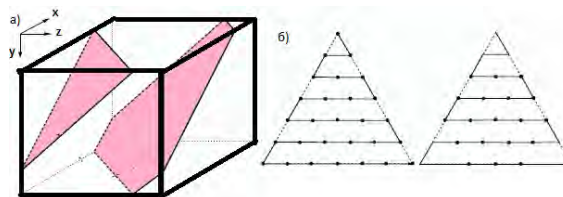


Рис. 3. Области куба при: а) рассечения коэффициентов ДКП и б) способах сканирования при квантовании

Переупорядоченные таким образом коэффициенты помещаются в линейный массив, при этом, поскольку обход куба всегда начинается с вершины (0, 0, 0), квантованный коэффициент ДКП (0, 0, 0) (DC коэффициент) оказывается первым элементом этого линейного массива, а все прочие (AC) коэффициенты располагаются вслед за ним.

Элемент массива в позиции N представляет собой индекс отсчета в кубе квантованных ДКП коэффициентов, который необходимо поместить в позицию N выходного линейного массива. При этом индексы заданы также в линейном виде, а связь между индексом и координатой (x, y, z) в кубе коэффициентов приведена ниже:

$$Idx = x + y * 8 + z * 8 * 8.$$

В том случае, если глубина куба равна 8, для zig-zag сканирования используется исходный массив. В противном случае производится формирование нового массива индексов путем однократного отбрасывания тех индексов, которые находятся за пределами текущего куба (к примеру, для глубины 2 отбрасываются все индексы, большие чем 127), и zig-zag сканирование осуществляется уже с использованием полученного таким образом нового массива индексов.

3. Декодирование видеопотока

Декодирование битового потока осуществляется в порядке, обратном порядку кодирования. Из битового потока извлекаются коды переменной длины, которые декодируются энтропийным декодером, восстанавливая тем самым трехмерные блоки квантованных ДКП коэффициентов.

Декодированные блоки подвергаются деквантизации и обратному трехмерному дискретному косинусному преобразованию, восстанавливая тем самым исходные кубы изображения (с точностью до потерь при преобразовании). Из полученных таким образом кубов видеоданных восстанавливается 8 кадров декодированной видеопоследовательности.

4. Результаты моделирования

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов сжатия было использовано множество различных изображений морских судов, полученных с камер и расположенных на беспилотниках с высоты 100-400м (рис. 4).

Далее эти результаты были сопоставлены со стандартными алгоритмами сжатия изображений с потерями. Были использованы три преобразования изображений, два из которых не зависят от содержания изображения.

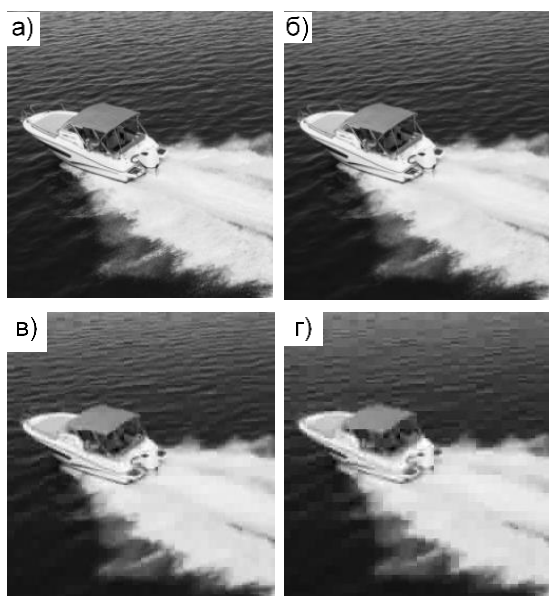


Рис. 4. Пример обработки изображения: а) исходное изображение, б) $R = 0,56$; $W = 32$ оп./пик.; $\varepsilon = 13$; в) $R = 0,1$; $W = 16$; $\varepsilon = 22$; г) $R = 0,02$; $W = 8$; $\varepsilon = 33$

Это классическое дискретное косинусное преобразование (ДКП), которое производит JPEG и дискретное вейвлет преобразование (ДВП -Wavelet Transform), которое производит JPEG2000 [12, 13].

Полученные результаты были квантованы в три коэффициента 8-битного размера. Коэффициент сжатия (Ксж.) был установлен на 0,5; 0,3 и 0,1, что означает, что для всех тестов использовалось битовая скорость передачи (bpp- бит на пиксель). На рис. 5 показаны визуальные результаты декомпрессии изображений с использованием указанных выше методов преобразования изображений (видеопотоки были получены при наблюдении крымского моста с высоты 200-500м).

Рассмотренная архитектура с низким энергопотреблением с использованием параллельных процессоров позволяет экономить электроэнергию за счет снижения тактовой частоты. Данный способ проектирования с низким энергопотреблением состоит в том, чтобы переупорядочить входные данные таким образом, чтобы на входных линиях данных происходило минимальное количество переходов для устранения избыточных вычислений, что позволяет снизить вычислительную сложность операций DCT.

Применение математического аппарата спектральной косинусной функции позволит снизить число операций сложения для видео куба (не более

4000) и сдвига (не более 700) без выполнения умножения.

Оптимально, с точки зрения использования вычислительных ресурсов при программной реализации алгоритма, использовать размеры видеокубы, равные целой положительной степени числа 2, что позволяет использовать предложенные быстрые адаптивные алгоритмы ДКП на базе разрабатываемые различными производителями микропроцессоров архитектуры Intel Corex86 с расширенным набором команд.

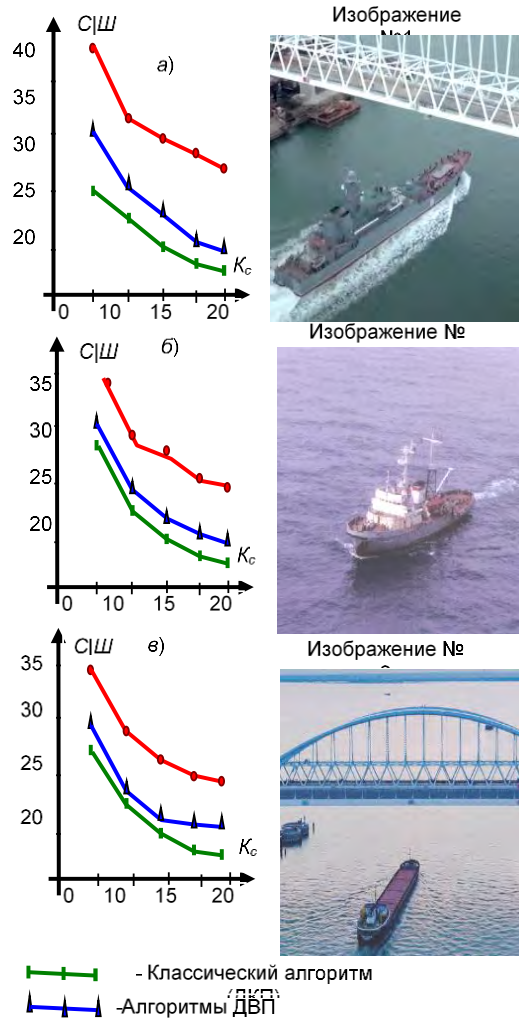


Рис. 5. Результаты моделирования алгоритмов кодирования на основе: а) классический алгоритм ДКП; б) ДВП и в) предложенный АДКП

Заключение

Поскольку реальные видеоданные морского сюжета характеризуются нестационарностью по пространственным и временным координатам, то предложенные адаптивные алгоритмы сжатия должны предусматривать определение оптимальных размеров видеокуба.

В Институте проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук были исследованы три типа морского видеопотока (рис. 5):
1) видеопоток с относительно сложным фоном – изображение № 1;

2) видеопоток со стационарным фоном – изображение № 2;

3) видеопоток с фоном средней сложности и изменяющимся фоном – изображение № 3.

Проведенные эксперименты показали, что наилучшие результаты можно получить при размерах 44. 88 и 1616 для пространственных координат. В связи с этим актуальной является разработка адаптивных алгоритмов ДКП-3D, включающих процедуру анализа движения. Указанные алгоритмы должны динамически выполнять предварительный анализ движения и определять оптимальные размеры видеокубов.

Результаты обработки различных видеопотоков морских сюжетов показали, что:

1) вычисление одномерного ДКП по оси X оказывается быстрее в силу того, что архитектура SSE позволяет осуществить одновременную загрузку до 4 чисел с плавающей точкой в том случае, когда эти числа расположены в памяти непосредственно друг за другом;

2) производительность АДКП лучше, чем ДВП и классический ДКП, с точки зрения степени сжатия, значение ошибки (ϵ) и визуального качества восстановленных изображений (С/Ш). По графикам рис. 5 для 8-битного изображения 512x512 среднее значение сигнала /шум (С/Ш) превышает на 20-30% по сравнению с алгоритмами ДВП и ДКП.

Литература

1. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Костикова Е.В. Транспортные видеосистемы на кристалле: методы и технологии проектирования. - СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. Монография. 2020. 340 с.
2. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Вислогузов В.В., Костикова Е.В. Многопроцессорная транспортная видеосистема наблюдения на базе технологии "система на кристалле" // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 172-179.
3. Agerwala, T., and Cocke, J. «High Performance Reduced Instruction Set Processors», IBM TJ. Watson Research Center Technical Report RC12434, 1987.
4. Almasi, G. S., and Gottlieb, A. Highly Parallel Computing, 2nd ed. Redwood City, CA: Benjamin/Cummings, 1994.
5. Березин В.В., Фахми Ш.С., Бобровский А.И., Черногоров В.С. Производительность многоядерных систем на кристалле фирмы intel-fpga для обработки видеоинформации// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 81-88.
6. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С. Видеосистемы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеоинформации// Датчики и системы. 2011. № 4. С. 58-61.
7. Bhuyan, L. N., Yang, Q., and Agrawal, D. P. «Performance of Multiprocessor Interconnection Networks», IEEE Computer Magazine, vol. 22, p. 25-37, Feb. 1989.
8. Bjornson, R. D. «Linda on Distributed Memory Multiprocessors», Ph. D. Thesis, Yale Univ., 1993.
9. L. Gueguen, A. Sergeev, B. Kadlec, R. Liu, J. Yosinski, Faster neural networks straight from JPEG, in: Advances in Neural Information Processing Systems, 2018, pp. 3933-3944.
10. A. Ghosh, R. Chellappa, Deep feature extraction in the DCT domain, in: 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2016, pp. 3536-3541.
11. N. Bozinovic, J. Konrad. Scan order and quantization for 3D-ДКП coding. IS&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc., Jul. 8-11, 2003.
12. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Крюкова М.С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений // Морские и-нтеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 129-136.
13. H. Lu, H. Wang, Q. Zhang, D. Won, S. W. Yoon, A dual-tree complex wavelet transform based convolutional neural network for human thyroid medical image segmentation, in: 2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI), 2018, pp. 191-198.

References

1. Fahmi Sh. S., Shatalova N. V., Kostikova E. V. Transport video systems on a crystal: methods and technologies of design. St. Petersburg -: Publishing and Printing Association of Higher educational institutions. Monograph. 2020. p. 340.
2. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Visloguzov V.V., Kostikova E.V. Mnogoprocessornaya transportnaya videosistema nablyudeniya na baze tekhnologii "sistema na kristalle" // Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 172-179.
3. Agerwala, T., and Cocke, J. «High Performance Reduced Instruction Set Processors», IBM TJ. Watson Research Center Technical Report RC12434, 1987.
4. Almasi, G. S., and Gottlieb, A. Highly Parallel Computing, 2nd ed. Redwood City, CA: Benjamin/Cummings, 1994.
5. Berezin V. V., Fahmi Sh. S., Bobrovsky A. I., Chernorov V. S. Performance of multicore systems on an intel-fpga chip for video information processing// Questions of radio electronics. Series: TV equipment. 2018. No. 3. pp. 81-88.
6. Tsitsulin A. K., Fahmi Sh. S. Video systems on a crystal: new architectural solutions in video information processing problems// Sensors and systems. 2011. No. 4. pp. 58-61.
7. Bhuyan, L. N., Yang, Q., and Agrawal, D. P. «Performance of Multiprocessor Interconnection Networks», IEEE Computer Magazine, vol. 22, p. 25-37, Feb. 1989.
8. Bjornson, R. D. «Linda on Distributed Memory Multiprocessors», Ph. D. Thesis, Yale Univ., 1993.
9. L. Gueguen, A. Sergeev, B. Kadlec, R. Liu, J. Yosinski, Faster neural networks straight from JPEG, in: Advances in Neural Information Processing Systems, 2018, pp. 3933-3944.

10. A. Ghosh, R. Chellappa, Deep feature extraction in the DCT domain, in: 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2016, pp. 3536-3541.
11. N. Bozinovic, J. Konrad. Scan order and quantization for 3D-ДКП coding. IS&T/SPIE Symposium on Image and Video Communications and Proc., Jul. 8-11, 2003.
12. Fahmi S.H.S., SHatalova N.V., Kryukova M.S. Vydelenie konturov morskih ob'ektov na osnove piramidal'no-rekursivnogo metoda predstavleniya izobrazhenij // Morskie i-ntellektual'nye tekhnologii. 2019. № 2-2 (44). S. 129-136.
13. H. Lu, H. Wang, Q. Zhang, D. Won, S. W. Yoon, A dual-tree complex wavelet transform based convolutional neural network for human thyroid medical image segmentation, in: 2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI), 2018, pp. 191-198.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шакиб Субхиевич Фахми, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел. +7(812) 234-36-75.

Ведущий научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. e-mail: shakeebf@mail.ru

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 shatillen@mail.ru

Елена Валентиновна Костикова, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Тел.: +(812) 748-96-45, м.т. 768, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Shakeeb S. Fahmi, Dr.Sci. (Eng), associate Professor, Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75.

Leading researcher at the Institute of transport problems.

N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12 Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68 e-mail: shakeebf@mail.ru

Natalia V. Shatalova, Ph.D. (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. shatillen@mail.ru @mail.ru

Elena V. Kostikova, Ph.D. (Eng), associate Professor of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, St.Petersburg, 198035. Russian Federation. Tel. +7(812) 748-96-45, i.p. 768, e-mail: kostikova.ev@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021
Принята к публикации: 15.04.2021

УДК 654

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.019>

Исследование метода определения истинной видимости на судах на основе радиолокационной карты и диаграммы интенсивности света маяка

Нгуен Тхай Зьонг¹ e-mail: nguyenthaiduong@vamaru.edu.vn¹ Морской Факультет, Вьетнамский Морской Университет

Аннотация. Определение истинной видимости является основной морской метеорологической операцией дежурного офицера на борту. В условиях ограниченной видимости суда должны работать в соответствии с Правилем 19 Международных правил предотвращения столкновений на море. Однако в настоящее время нет документов, которые бы четко и количественно давались в руководстве по определению видимости на море. С другой стороны, системы управления безопасностью некоторых судоходных компаний выдают предупреждения, и дежурный офицер должен уведомить или вызвать капитана, когда видимость упадет до определенного предела. Это затрудняет для дежурного офицера принятие независимого решения об избежании столкновения в случае ухудшения видимости. В целях содействия решению актуальной морской проблемы, о которой говорилось выше, целью данной работы является исследование метода определения видимости на борту судна в определенных погодных условиях.

Ключевые слова: Дежурный офицер, ограниченная видимость, метеорологическая видимость, световой диапазон, номинальный диапазон.

Research on determination method of the true visibility on vessels based on radar and light intensity chart of the lighthouse

Nguyen Thai Duong¹ e-mail: nguyenthaiduong@vamaru.edu.vn¹ Faculty of Navigation, Vietnam Maritime University

Abstract. Determining the true visibility is a basic marine meteorological operation of the duty officer on board. In the restricted visibility condition, vessels must sailing in accordance with Rule 19, International regulations for preventing collisions at sea. However, there are currently no documents that given clearly and quantitative in the guidance for determining visibility at sea. Otherwise, the warnings in the safety management systems of some shipping companies were given, and the officer of watch must inform or call the captain when the visibility reduced to a certain limit. This makes it difficult for the officer of watch to give the independent collision avoidance decision in the event of reduced visibility. In order to contribute to solve the actual maritime problem which is mentioned above, the goal of the paper is research on determine method of the visibility on board in a certain weather condition.

Key words: Officer of watch, restricted visibility, meteorological visibility, luminous range, nominal range..

Introduction

In maritime history, when global satellite positioning system (GPS) were not born, determining the maximum visibility of lighthouses is a basic operation that assists officer of watch in the determining the ship's positions and especially entering shore when vessels are navigating in area with limited safety equipment. Nowadays, GPS system makes navigation more convenient, but determining the true visibility is still essential in the avoidance of collision with keeping of the officer of watch. The warnings in the International safety management systems of some shipping companies were given, and the officer of watch must inform or call the captain when the visibility reduced to 3 nautical mile [1]. Thus, When the weather was difficult, the officer of watch must know how to determine the true visibility to decide whether to inform the captain or not. Navigation in an area with poor safety systems, no detailed charts and inaccurate geodetic systems, determining the maximum visibility of the lighthouse to help the officer of watch have a third position line, cross-check to improve the reliability of the ship's positions which are determined by GPS receiver. And more importantly, in this case, determining the true visibility of the lighthouse is a factor that support more accurate and safe for entering ashore.

Depending on the requirements of safe navigation in specific maritime conditions, the true visibility which is determined on board may be the target visibility, the visibility of the lighthouse or the visible horizon, etc. To contribute to solving maritime safety problem which is

mentioned above, the paper focuses on the determine method of the visibility at sea in two common cases in ship navigation practice as follows:

Determining the true visibility in bad weather conditions, affecting the safe navigation of the ship,

Determining the lighthouse's maximum visibility to assist in determining the ship's positions, identifying targets to entering ashore when navigation in areas where has a limited safety system.

1. Determining the visibility at sea

Visibility is the maximum distance an observer can see a target with the naked eye in a given weather condition. In fact, there are many different classifications and definitions of visibility. In marine navigation the visibility is classified according to the intended use which is published in the document "List of lights and fog signa - NP.79" [2].

Geographical visibility: is the maximum distance an observer can see a target. Geographical visibility only considered the height of the eye, target height, curvature of the earth's surface and ground refraction.

Luminous range: Is the maximum distance an observer can see a lighthouse. Luminous range only considered the intensity of the lighthouse and meteorological visibility at the time of observation.

Nominal range: Is the Luminous range with the assumption that the meteorological visibility of 10 nautical miles at the time of observation. Nominal range is also known as visibility on the chart, which is the lighthouse visibility value which is recorded on the chart

In marine practice, it is common to calculate and define two basic types of visibility for safe navigation are: visible horizon and lighthouse's visibility.

1.1. Visible horizon

Theoretically, visible horizon can be denoted as below (figure 1):

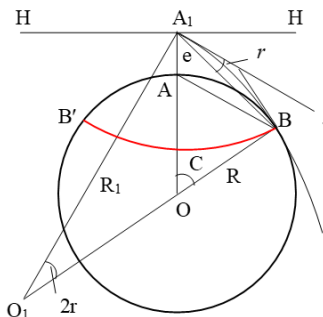


Figure 1. Visible horizon

The true horizontal plane is the imaginary plane through the observer's eye and perpendicular to the plumb line direction (HH plane). Assuming the observer is at position A, the radius of the Earth is R, the observer's eye is at position A1, and the observer's eye is a height e above the point A on the surface: A1A = e. In ideal conditions, the observer sees the Earth's surface in the A1x direction which is the tangent to the Earth's surface at point B. However, the Earth is surrounded by an atmosphere with different air densities and decreases with altitude, so the ray of lights going from the eye of the observer are refracted and are bent, this is ground refraction phenomenon. So the ray of light from B to the observer's eye is bent along the arc A1B. From point A1 turns a circle with radius A1B, we get an arc BB' which is called the visible horizon. The visible horizon is the cross-section of the sky to the sea surface.

Thus, the observer sees point B in the direction which is the tangent to curve A1B. In the not very large range, consider the arc A1B as the circular arc with center is O' and radius is R1. Due to ground refraction, it increases the visible horizon distance.

The ground refractive index $k = \frac{R_1 - R}{R_1}$ can be calculated as below [3]:

$$k = 503 \frac{P}{T^2} (0.0343 + \frac{dT}{dh}) \quad (1)$$

where:

- T : Air temperature (K⁰)
- P: Air pressure (mb)
- e : The height of the observer's eye (m)

The ground refractive index always changes depend on the region, air pressure, air temperature and observer's height, the average value $k = 0,15$ [4].

The distance A1B is called the visible horizon. However, the solid arc AB and A1B are approximately the same length, we should consider the visible horizon $D \approx AB$.

Consider the triangle AA1B, and the sin function is applied as below

$$\frac{\sin \angle A_1BA}{AA_1} = \frac{\sin \angle A_1AB}{A_1B} \Leftrightarrow \frac{\sin(\frac{C}{2} - r)}{e} = \frac{\sin(90^0 + \frac{C}{2})}{d} \quad (2)$$

Since $\frac{C}{2}$ and $(\frac{C}{2} - r)$ are small angles, $\sin(90^0 + \frac{C}{2}) \approx 1$ and $\sin(\frac{C}{2} - r) \approx \frac{C}{2} - r$

Substituting $\sin(90^0 + \frac{C}{2}) \approx 1$ and $\sin(\frac{C}{2} - r) \approx \frac{C}{2} - r$ into (2), one can get

$$\frac{\frac{C}{2} - r}{e} = \frac{1}{D} \Rightarrow D = \frac{2e}{C - 2r} \quad (3)$$

otherwise: $C = \frac{D}{R}$ và $2r = \frac{D}{R_1}$, substituting into (3)

we obtained:

$$D = \frac{2e}{\frac{D}{R} - \frac{D}{R_1}} = \frac{2eRR_1}{D(R_1 - R)} = \frac{2eR}{D(1 - \frac{R}{R_1})} = \frac{2eR}{D(1 - k)} = \sqrt{\frac{2R}{1 - k}} \sqrt{e} \quad (4)$$

Computing with the Earth's radius for $R = 6371,0088$ km and ground refractive index for $k = 0.15$, we have:

$$D = 2.09\sqrt{e} \quad \text{with } D \text{ in nautical miles, and } e \text{ in metres} \quad (5)$$

$$D = 1.23\sqrt{e} \quad \text{with } D \text{ in nautical miles, and } e \text{ in feet} \quad (6)$$

1.2. The geographical visibility of the target

The geographical range is the farthest distance that an observer can see the lights in good weather conditions. This value depend on the observer's height, the target's height, the curvature of the earth's surface and atmospheric refraction. In fact, the geographical range is the sum of the observer's and target's visible horizon (figure 2).

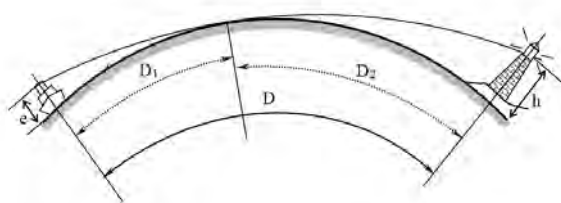


Figure 2. Target visibility

The target visibility can be calculated as below [5]:

$$D_T = D_1 + D_2 = 2.09(\sqrt{e} + \sqrt{h}) \quad (7)$$

or:

$$D_T = D_1 + D_2 = 1.23(\sqrt{e} + \sqrt{h}) \quad (8)$$

where:

- D_T: The target's visible of observer, in nautical miles,
- D₁: The observer's visible horizon, in nautical miles,
- D₂: The target's visible horizon, in nautical miles.

In (7), e and h are the height of the observer's eye and the target's height, respectively, and in metres,

In (8), e and h are the height of the observer's eye and the target's height, respectively, and in feet.

1.3. Determination of the true visibility on the ship

Derived from practical marine, when a limited safety visible value is given by a corporate safety management system (figure 3)



Figure 3. Warning for visible danger on a ship

Figure 3 shows the application of limited visibility for MV. JEWEL OF SHINAS of the New Ocean Shipmanagement PTE LTD company. In this case, the officer of watch has to solve two problems: What kind of visibility and determines the time when the visibility is reduced to 3 knots.

In all cases, the true visibility on the ship is understood as the radius of the circle which have center on the bridge position. In this case, the officer of watch must visually observe all common marine targets such as: target ships, bouys, floating obstacles, ... in above circle. Satisfying this requirement, the true visibility is defined as the range of the visible horizon. All targets within the range from the visible horizon to the ship's position are easier to observe than the visible horizon. (figure 4).

Determination of the visible horizon with radar target

In case of the maritime area has the radar targets, on the radar screen, we select the target group with the maximum access speed to own ship. Constantly following through the naked eye, when the target begins to appear on the visible horizon, determine the distance to the target by radar, the measured value is the visible horizon or the true visibility at shipping time. However, we reality only determine the visible horizon in certain directions with targets, the officer of watch should assess the visibility in the direction with the lowest visibility to be active in safe navigation. General rule of thumb is visibility on the most direction restrictive and proactively notify to the captain earlier than warning.



Figure 4. The visible horizon on the ship
Determination of the visible horizon without radar target

When the ships are sailing on the open sea, and in the marine areas without radar targets, the officer of watch will determine the approximate visible horizon. Based on the weather forecasts which are received from Inmarsat C, Facsimile, Navtex, ... combined with practical observation experience. Visible horizon is determined by the international range scale (Table 1)

level international scale for horizontal visibility [6]

Table 1

Level of visibility	Distance	Weather characteristics	Featured visibility
0	0-50m	Dense fog	Extremely bad visibility
1	50-200m	Thick fog	Very bad visibility
2	200-500m	Medium fog, very thick snow	Very bad visibility
3	500-1000m	Weak fog, thick snow	Bad visibility
4	1-2km	Medium snow, heavy rain	Bad visibility
5	2-4km	Weak snow, downpour	Average visibility
6	4-10km	Moderate rain, weak snow, light fog	Average visibility
7	10-20km	Light rains, clouds change	Good visibility
8	20-50km	No precipitation, sunny	Very good visibility
9	Over 50km	Completely transparent atmosphere	Extremely good visibility

In case of without radar targets, usually, the level of marine danger is not high. Therefore, the error of determining the visible horizon does not have a great impact on the safe navigation of the ship. On the other hand, the officer of watch needs to assess the safety of navigation when the visibility reduces to the 3 nautical mile of limit to take appropriate action.

2. The lighthouse's visibility

Determine the true visibility of the lighthouse is an important skill for the duty officer when the ships are sailing in an area with a limited marine safety assurance system. In these areas or when the ship have been unusual breakdown, determining the true visibility of lighthouse will be an important factor that supports the

determining the ship's position and entering ashore. Determining the lighthouse's visibility need to be information on the chart, the meteorological visibility and the diagram in the "List of lights and fog signal" document.

Before March 31st, 1972, the visibility of the lighthouse indicated on Admiralty British charts was the geographic visibility corresponding to an observer's height of 5 meters or 15 feet. With the nautical chart which are published after March 31st, 1972, the visibility of the lighthouse indicated on British nautical charts was nominal range [7]. In practice, the meteorological visibility at the observation time can be considered approximate as the visible horizon which is defined in section 2.3 [8-11].

Figure 5, the information of SOUTHERN HEAD lighthouse, the nominal range is 16 knots.

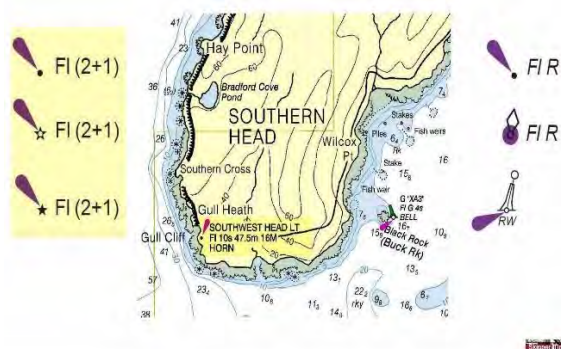


Figure 5. The lighthouse's information on Admiralty British chart

At the navigation time, the meteorological visibility that is received and observed is 20 knots, the observer's height is 11 meters, ignoring the influence of the tides, determining the true visibility of the light according to the below steps:

Step 1: Determine the geographical visibility of the light (D_G):

Look up the table or calculate as the formula (7), we obtain:

$$D_G = 2.09(\sqrt{e} + \sqrt{h}) = 2.09(\sqrt{11} + \sqrt{5}) = 11.6 \text{ nm} \quad (9)$$

Step 2: Determine the luminous range of the light (D_L):

Look up the chart in the "List of lights and fogsignal" document (Figure 6) [2], the value of the luminous range at the navigation time is $D_L = 22$ knots.

Step 3: Determine the target visibility (D_T):

The target visibility $D_T = 11.6$ nm, in this case $D_L > D_G$, this means that, the SOUTHERN HEAD light only

transmit at the maximum distance of 22 nm, however, the observer only see the light at a maximum distance of 11.6 nm.

Assuming that, the meteorological visibility is reduced to 5 nm, look up the chart to obtain the corresponding value of the luminous range is 10 nm.

The target visibility $D_T = 10$ nm, in this case $D_L < D_G$, this means that, an observer can see targets at a distance of 10.6 nm, however, the SOUTHERN HEAD light could only transmit at the maximum distance of 10 nm.

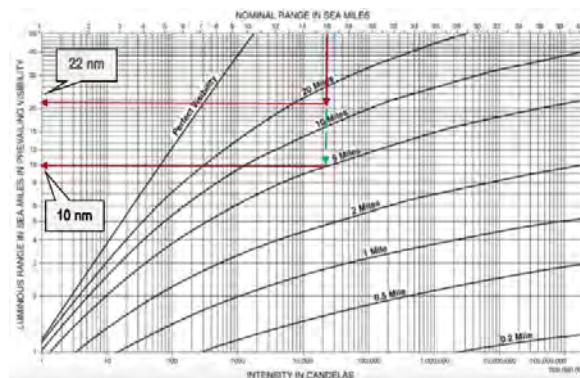


Figure 6. luminous range lookup graph

Conclusions

The sailing problem in the restricted visibility is a complex combination in the field of distinct maritime expertise such as: marine facility, ship handling, marine meteorology and hydrology, marine environmental safety, marine radio equipment and devices, maritime law, ... With the goal of the paper is research on the method of determining the true visibility on the ship, the paper has solved the proposed problem, namely:

- The true visibility on board in the avoidance of the collision watch keeping is affirmed as the visible horizon,
- The true visibility on board with maritime targets are accurately determined,
- The true visibility on board without maritime targets are estimated.
- The maximum visibility of the lighthouse in actual maritime conditions is calculated.

The research results can help the officer of watch have a basis to given the action decision in accordance with company regulations, improve the safety of navigation.. otherwise, when the meteorological visibility on board is received and determined are more accurate, the determination of the maximum visibility of the lighthouse can be conducted automatically, and giving reliable results.

References

1. New Ocean Shipmanagement PTE LTD. International Safety Management, 2018.
2. Admiralty List of Light and Fog Signals, NP 79. The United Kingdom Hydrographic office, 2018.
3. Hirt, Christian; Guillaume, Sebastian; Wisbar, Annemarie; Bürki, Beat; Sternberg, Harald, Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. Journal of Geophysical Research, 115 (D21), 2010.
4. Young, Andrew T. Understanding Astronomical Refraction. The Observatory. **126**: 82–115. Bibcode:2006Obs...126...82Y.
5. Nathaniel Bowditch. The American Practical Navigator. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, Maryland, 1995.
6. Mariner's Handbook. Navy Hydrographer England, 1989.

7. Admiralty Manual of Navigation. London Her Majesty's Stationery Office, 1987.
8. T.D. Nguyen, "Evaluation of the accuracy of the ship location determined by GPS global positioning system on a given sea area," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1515 (042010), 2020. (*Open access*).
9. T.D. Nguyen, "Determining safety limitations and the frequency of determining vessel location when establishing marine bases on the Vietnam's sea areas," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1515 (042012), 2020. (*Open access*).
10. T.D. Nguyen, "Determine the effect of distortion of Mercator chart, Gnomonic chart on maritime safety and method of navigation when using Gnomonic chart," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1515 (052080), 2020. (*Open access*).
11. Thai Duong Nguyen and Trong Duc Nguyen, "Calculation of parameters for altering the ship's course at sea using Artificial Neural Network (ANN)," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 862 (032097), 2020. (*Open access*).

Литература

1. Новый Океаный Метод Управления Судном PTE LTD. Международный менеджмент безопасности, 2018.
2. Адмиралтейский список световых и противотуманных сигналов, НП 79. Гидрографическое управление Великобритании, 2018.
3. Hirt, Christian; Guillaume, Sebastian; Wisbar, Annemarie; Bürki, Beat; Sternberg, Harald, Контроль коэффициента преломления в нижних слоях атмосферы с помощью управляемой установки одновременных взаимных измерений вертикальных углов. Журнал геофизических исследований, 115 (D21), 2010.
4. Young, Andrew T. Понимание астрономической рефракции. Обсерватория. **126**: 82–115. Bibcode:2006Obs...126...82Y.
5. Nathaniel Bowditch. Американский практический навигатор. Национальное агентство изображений и картографии, Бетесда, Мэриленд, 1995.
6. Справочник моряка. Гидрограф ВМС Англии, 1989.
7. Адмиралтейское руководство мореплавания. Лондонская канцелярия Ее Величества, 1987.
8. Т.З. Нгуен, " Оценка точности местоположения судна, определяемого системой глобального позиционирования GPS в заданном районе моря," Физический Журнал: Серия конференций 1515 (042010), 2020. (*Open access*).
9. Т.З. Нгуен, " Определение ограничений безопасности и периодичности определения местоположения судов при создании морских баз в акватории Вьетнама.," Физический Журнал: Серия конференций, 1515 (042012), 2020.
10. Т.З. Нгуен, " Определите влияние искажения карты Меркатора, гномонической карты на безопасность на море и метод навигации при использовании гномонической карты.," J Физический Журнал: Серия конференций 1515 (052080), 2020.
11. Тхай Зьонг Нгуен, Чонг Дык Нгуен, " Расчет параметров изменения курса судна в море с помощью искусственной нейронной сети (ИНС)," IOP Серия конференций: Материаловедение и инженерия., vol. 862 (032097), 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Нгуен Тхай Зьонг, кандидат технических наук, Заместитель директора Морского факультета, Вьетнамский Морской Университет, 484 Лач Чау ул., Хайфонг город, Вьетнам, e-mail: nguyenthaiduong@vamaru.edu.vn
Nguyen Thai Duong, PhD (Eng), Vice dean of Faculty of Navigation, Vietnam Maritime University, 484 Lach Tray str. Hai Phong city, Vietnam, , e-mail: nguyenthaiduong@vamaru.edu.vn

Поступила в редакцию: 09.02.2021

Принята к публикации: 15.05.2021

Потенциал развития логистики Арктической зоны РФ за счет применения дронов

Н.В. Шаталова¹ e-mail: shatillen@mail.ru, О.М. Михов¹ e-mail: shatillen@mail.ru,
О.В. Бородина¹ e-mail: borodinaov@gmail.ru

¹Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

Аннотация. В статье рассматривается содержание транспортно-логистических задач в Арктике, а также перспективы международного сотрудничества. Изучен опыт других стран – Канады, США – в использовании дронов в логистике и доставке грузов. Раскрыта сущность использования беспилотных летательных аппаратов в логистике Арктической зоны, охарактеризованы преимущества и недостатки дронов на сегодняшний день и специфика их использования в Арктической зоне. Предложено использовать дроны в таких направлениях, как мониторинг состояния окружающей среды; контроль реальной загрузки логистических площадок на земле; транспортировки и перевалки грузов. Предлагается создать базу для оценки эффективности бюджета развития дронов для обеспечения логистических процессов в Арктической зоне РФ. Для этого проведено экономическое обоснование использования дронов в Арктической зоне в виде расчета чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости проекта по использованию БПЛА в Арктической зоне. В качестве фактора экономии выступает меньшая потребность в топливе по сравнению с традиционными видами транспорта, используемыми в Арктике. Выделены проблемы и перспективы развития беспилотных перевозок в Арктической зоне. Сделан вывод о возможностях и изменениях развития в логистической деятельности в Арктической зоне в ближайшие годы.

Ключевые слова: логистическая деятельность, дроны, Арктическая зона, технические средства, инновационные показатели, освоение Арктики, обеспечение, транспортировка.

Development potential of logistics in the Arctic zone of the Russian Federation through the use of drones

Natalia V. Shatalova¹ e-mail:; Oleg M. Mikhov¹ e-mail: shatillen@mail.ru,
Olga V. Borodina¹ e-mail: borodinaov@gmail.ru

¹Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article discusses the content of transport and logistics tasks in the Arctic, as well as the prospects for international cooperation. The experience of other countries – Canada, the United States – in the use of drones in logistics and cargo delivery was studied. The essence of the use of unmanned aerial vehicles in the logistics of the Arctic zone is revealed, the advantages and disadvantages of drones today and the specifics of their use in the Arctic zone are described. It is proposed to use drones in such areas as monitoring the state of the environment; monitoring the real workload of logistics sites on the ground; transportation and transshipment of goods. It is proposed to create a basis for evaluating the effectiveness of the budget for the development of drones to support logistics processes in the Arctic zone of the Russian Federation. For this purpose, an economic justification for the use of drones in the Arctic zone was carried out in the form of calculating the net discounted income and the payback period of the project for the use of UAVs in the Arctic zone. As a factor of economy, there is less need for fuel in comparison with traditional modes of transport used in the Arctic. The problems and prospects for the development of unmanned transportation in the Arctic zone are highlighted. The conclusion is made about the opportunities and changes in the development of logistics activities in the Arctic zone in the coming years.

Keywords: logistics activities, drones, Arctic zone, technical means, innovative indicators, development of the Arctic, provision, transportation.

Введение

Полностью отсутствующая или слабо развитая транспортно-логистическая инфраструктура приводит к существенному расхождению значимости освоения природно-ресурсного потенциала российской Арктической зоны и шельфа арктических морей общим требованиям обеспечения национальной безопасности и к снижению конкурентных возможностей России, в целом имеющей уникальные географические преимущества.

В связи с этим, в публикации хотелось бы раскрыть следующие аспекты:

- особенности применения дронов в Арктической зоне;

- экономическое обоснование использования дронов в Арктической зоне;

- международное сотрудничество в области беспилотного транспорта в Арктической зоне;

- проблемы и перспективы развития беспилотных перевозок в Арктической зоне.

Российская территория в Арктике – полярная область Земли в пределах границ России, примыкающая к Северному полюсу и включающая северное побережье Евразии, Северный Ледовитый океан с островами и часть Тихого океана, омывающую Чукотку. Россия вынуждена учитывать тот факт, что зона Арктики формально (через Норвегию, Северную Америку, Гренландию) входит в сферу действия Вашингтонского договора о создании Североатлантического альянса. Проблема многочисленных территориальных споров и потенциальной эксплуатации полезных ископаемых

превращает Арктику в поле геополитического соперничества. В этих условиях развитие логистики может стать решающим фактором конкурентоспособности страны в Арктическом регионе.

Правовой статус арктических территорий регулируется нормами международного права, национальным законодательством приарктических государств и двусторонними соглашениями. Само по себе освоение Арктики – это конкретная «рыночная» ниша, ради чего и ведутся разработки, связана с накопителями, с альтернативными источниками энергии [1, 2], для которой вопросы логистики весьма важны.

Для Российской Федерации Арктическая зона имеет стратегическое значение – данный вопрос обсуждался на форуме «Арктика – территория для передовых технологий», состоявшейся в марте 2017 г. Представители государства и бизнеса преимущественно говорили о том, каким направлениям промышленного развития Арктической зоны следует уделить отдельное внимание с учетом эффектов для всей экономики. От обсуждения экономических вопросов диалог переходил на обеспечение бытовых моментов, создания пригодных для проживания условий жизни простых людей, которые и будут развивать Арктику. Среди этих моментов была и логистика, которая имеет специфические особенности для Арктической зоны, так как условия жизни на этой территории сильно отличаются от условий на других территориях, в том числе из-за сложной климатических условий, а также ввиду большой удаленности населенных пунктов друг от друга.

Для решения таких проблем в мире широко применяются технологические инновации в логистической сфере. Так, за последнее время в мире активно изучаются различные аспекты создания и применения беспилотных транспортных средств, таких как автомобилей, самоходных механизмов, бронетранспортеров, летательных аппаратах различного назначения. И для решения бытовых проблемы жителей Арктики также необходимы передовые технологии. Одной из таких технологий в области логистики может стать использование дронов. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) или дроны – это устройства, предназначенные для беспилотной формы доставки товаров.

1. Особенности применения дронов в Арктической зоне

Сейчас вопрос доставки дронами является противоречивым и не досконально изученным, поэтому в российской научной литературе имеется ограниченное количество статей и исследований на эту тему. Однако, американскими коммерческими компаниями проводятся сейчас исследования по эффективности такого метода доставки, а также по выявлению мнения потребителей на счет доставки товаров дронами.

Так, директор американской фирмы «Amazon» в 2013 году заявил о возможности использования дронов для доставки товаров. Такое заявление сначала вызвало бурю скептицизма, но затем вызвало большой интерес у аудитории по всему миру. Дроны получили широкое использование в

военных сфере, но с усовершенствованием БПЛА, вычислительные системы становятся все компактнее, а аккумуляторные батареи все качественнее, поэтому появилась возможность создавать такие беспилотные летательные аппараты для использования в разных сферах жизни. На сегодняшний день любой может себе позволить приобрести собственный беспилотный аппарат, а их конструирование в виде мультикоптеров (летательных аппаратов с несколькими несущими винтами) делает управление достаточно простым.

Использование дронов в логистике, с целью доставки, все больше становится актуально для общества. К преимуществам дронов (БПЛА) относится доставка грузов в районы с малоразвитой транспортной инфраструктурой, к которым относится Арктическая зона.

Однако существуют значительные недостатки беспилотных летательных аппаратов, такие как:

- ограниченное количество грузов, которые может доставить дрон;
- шум, который они создают;
- низкая автономность работы.

Кроме того, необходимо отметить, что использование таких устройств слабо регулируется законодательством, что вносит свою долю рисков.

Совокупность всех факторов не позволяет высоко оценить готовность к использованию дронов в настоящее время, но довольно перспективным с оглядкой на будущее и дальнейшее развитие технологий. Уже сейчас некоторые крупные инновационные компании начинают реализацию разнообразных проектов, используя дроны. В 2019 году компания «Drone Delivery Canada» разработала и запустила первый сервис воздушной доставки с помощью дронов – беспилотники летают по заранее проложенным маршрутам, в соответствии с авиационными правилами Канады. Проект Wing, разработанный компанией Google Alphabet, будет сотрудничать с двумя австралийскими компаниями – медицинской и ресторанной [3]. Калифорнийский стартап разрабатывает беспилотные летательные аппараты для доставки донорской крови, лекарств и вакцин в самые отдаленные места Соединенных Штатов. Компания Zipline уже отправляет свои дроны с медикаментами в Руанду, а именно в те районы страны, где отсутствуют дороги. Самолеты Zipline массой 10 кг и доставляют груз до 1,3 кг. Они могут летать на расстояние 120 километров за один раз. Другой грузовой беспилотник, и тоже амфибийного типа, разрабатывается в рамках американского проекта Nautilus. Компания планирует продавать в будущем беспилотник крупным логистическим компаниям мира. Именно такие технологии и могут оказаться весьма перспективными для Арктической зоны.

Ожидается, что к 2022 году объем мирового рынка коммерческих беспилотных летательных аппаратов достигнет 2,07 млрд. долл. США, согласно новому отчету Grand View Research Inc. Повышение полезности в правоохранительных и сельскохозяйственных приложениях, как ожидается, будет играть ключевую роль в росте рынка в течение прогнозируемого периода. Благодаря тому, что их присутствие ощущается в военном секторе, эти беспилотные летательные аппараты (БПЛА) постепенно приобрели заметное значение в

коммерческом секторе и, как ожидается, превзойдут текущие темпы роста.

Тем не менее, такие современные технологии БПЛА могут быть использованы не только для доставки грузов. На сегодня они часто комплектуются довольно качественными камерами, а их аппаратное обеспечение позволяет вести как постоянную запись, так и трансляцию изображения на внешние устройства в реальном времени. Это дает возможность применения дронов в Арктической зоне в мониторинговых или иных целях. С их помощью можно:

- осуществлять мониторинг состояния окружающей среды;
- контролировать реальную загруженность площадок на земле;
- отслеживать транспортировку и перевалку грузов на земле.

Контроль технического состояния площадки разгрузки и склада имеет важное значение. Тем не менее, процедура детальной проверки состава достаточно трудоемкая и часто требует частичной, или даже полной остановки работы по доставке, а, следовательно, выполняется как можно реже при крайней необходимости. Беспилотник со средствами видеонаблюдения с помощью оператора сможет достаточно просто сделать детальную инспекцию состояния процессов разгрузки-погрузки-складирования, а затем специалист по видеозаписи - определить проблемные или сомнительные участки и точно их проверить. Такой подход позволит значительно повысить качество обслуживания логистического процесса и безопасность его эксплуатации.

По оценкам специалистов [4] использование дронов поможет также сокращать время, необходимое на доставку грузов на сложных маршрутах – например, при обеспечении условий проживания сотрудников. Если заказ нужно привезти в два пункта, находящиеся в одном направлении и разделенные несколькими километрами, курьер может запустить дрон с грузом до первого, пока будет доставлять другой груз ко второму. Кроме того, дроны помогут повысить эффективность грузоперевозок и одновременно с тем уменьшить загрязнение окружающей среды, что весьма важно для экологически правильного развития Арктической зоны. В то же время, широкомасштабное внедрение дронов, как и в целом информационных технологий, обостряет вопрос замены работников целых отраслей на искусственный интеллект и роботов.

Итак, у беспилотного способа доставки грузов в Арктической зоне существуют свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести:

- снижение транспортных расходов. Доставка дронами имеет ряд преимуществ как для предприятий, так и для потребителей. Сроки доставки сокращаются от двух до трех дней, до нескольких часов. К тому же, существует меньшая вероятность повреждения груза во время доставки, так как полет дрона достаточно плавный;

- сокращение времени доставки. Дроны доставят товар до заданной точки по запланированным оптимизированным маршрутам, при этом на них не влияет низкая развитость транспортной сети в Арктической зоне. Потребители могут получить груз меньше, чем за 2-3 часа;

- уменьшение загрязнения окружающей среды. Известно, что доставка дронами удобнее, чем грузовые автомобили или самолеты, а также эффективнее. Использование дронов при этом резко сократит выбросы углерода, тем самым в определенной степени будет защищать окружающую среду.

Среди недостатков дронов для развития логистики Арктической зоны можно назвать такие:

- небольшая грузоподъемность, которая составляет примерно 3-4 килограмма (редко до 20 кг), приводит к тому, что дроны не могут транспортировать крупногабаритные грузы;

- ограничение времени автономной работы. Дрон может непрерывно работать несколько часов, что существенно ограничивает радиус доставки грузов. Для коммерческого использования необходимо создавать целую систему из дронов и станций для них, чтобы они могли транспортировать груз на достаточно большое расстояние в пределах Приарктической и Арктической зон. В этой проблеме можно опираться на систему INTERACT, которая будет описана далее;

- вопросы конфиденциальности. Поскольку во время использования дроном применяется GPS для определения точного места назначения, а также встроенная камера, которая позволяет избегать препятствия во время транспортировки и безопасно приземлиться, это может не устраивать определенных потребителей – например, военных, которые будут беспокоиться о своей конфиденциальности.

2. Экономическое обоснование использования дронов в Арктической зоне

Организация Арктической транспортной линии, проходящей через Арктическую зону, может дать значительный мультипликативный эффект для развития всех смежных отраслей экономики, увеличить общий пассажиропоток, наладить конвейерное движение, способствовать созданию новых рабочих мест и модернизации всей инфраструктуры, обеспечивающей безопасное судоходство [5].

На данный момент транспортно-логистическая инфраструктура в некоторых местах полностью отсутствует или слабо развита. Это является существенным препятствием для раскрытия потенциала Арктической зоны. Чтобы выйти на новый уровень развития Арктики, необходимо решить проблему низкой транспортной связности. Коммуникационная насыщенность Арктической зоны России в настоящее время очень низка, особенно с точки зрения развития наземной транспортной сети, но предполагается её увеличение [6]. Воздушный и речной транспорт стоит дорого. В этих условиях морские перевозки являются единственно возможным способом транспортировки грузов для многих арктических регионов [7, 8]. Но и они весьма зависят от сезонных условий.

Построим процедуру обоснования выбора направлений развития дронов в целях использования в логистической деятельности Арктической зоны. Для этого необходимо изучить потребности относительно возможных государственных интересов, развитие высоких

технологий, занятость населения в авиапромышленной сфере.

Для конкретизации эффекта, получаемого от использования дронов в Арктической зоне, рассмотрим проекты с разным сочетанием включенности БПЛА. Основную часть расчетов можно проводить индивидуально, и к сравнению альтернатив можно перейти, когда логика инвестиционного анализа потребует составить прогноз потока денежных средств, рассчитать показатели чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости. Поэтому на этапе расчета индивидуальных показателей по трем вариантам были определены затраты на топливо и заработную плату операторов и пилотов, переменные и постоянные издержки, потребность в инвестициях.

При перевозке грузов базовая ставка может быть рассчитана следующим образом:

$$T_{\text{баз}} = (T_{\text{МТТбаз}} + (T_{\text{МТТ}} - T_{\text{МТТбаз}}) * k_d) * k_p, \quad (1)$$

где $T_{\text{МТТ}}$ – базовая ставка тарифа для определенной весовой категории на конкретном расстоянии (тарифный пояс для Арктической зоны примем 191-200 км.), после которого применяется коэффициент k_d , руб. за одну тонну груза;

k_d – коэффициент дальности (до 200 км $k_d=0,68$);

k_p – поправочный коэффициент погрузочно-разгрузочных работ, примем его одинаковым для традиционного транспорта и дронов ($k=0,70$ и $k=0,63$).

Стоимость провозной платы при перевозке 20 тонн условного груза традиционным транспортом (на примере вездехода МТЛБ-7) и грузовым дроном составит:

$$T_{\text{баз трад. тр.}} = (12,99 + (34,76 - 12,99) * 0,68) * 0,90 * 1,1 * 0,7 = 19,26 \text{ тыс.руб.}$$

$$T_{\text{баз дрон}} = (12,99 + (2,90 - 12,99) * 0,68) * 0,60 * 0,63 = 0,745 \text{ тыс.руб.}$$

Потребное количество транспортных единиц для перевозки условного груза определяется по формуле 2:

$$N = \frac{M_{\text{груза}}}{\text{Грузоподъемность}} \quad (2)$$

$$N_{\text{трад.тран.}} = \frac{20}{5,5} = 3,6 \approx 4 \text{ ед.}$$

$$N_{\text{дрон}} = \frac{20}{0,2} = 100 \text{ ед.}$$

Общая стоимость доставки условного объема груза традиционным транспортом составит:

$$19,26 * 4 = 77,04 \text{ тыс. руб.}$$

Общая стоимость доставки условного объема груза дронами составит:

$$0,745 * 100 = 74,5 \text{ тыс. руб.}$$

Выгода от использования дронов на перевозке составит:

$$77,04 - 74,5 = 2,54 \text{ тыс. руб.}$$

В относительных единицах:

$$2,54 / 77,04 * 100\% = 3,3\%$$

То есть использование дронов при доставке грузов в Арктической зоне позволяет сэкономить до

3,3% от общей стоимости перевозок традиционным транспортом.

Удельный (на вес груза) эффект от использования дронов при перевозке составит $2,54 / 20 \text{ т.} = 0,127 \text{ тыс. руб.}$ на каждую тонну груза.

Используя данные расчеты, в таблице 1 приведены результаты расчета индивидуальных показателей.

Альтернативы по анализируемым проектам существуют по источникам финансирования; по срокам начала осуществления (по проектам 1 и 2); между проектами 1 и 2 (хотя отказ от одного в пользу другого нежелателен). При этом в расчет принимаются реальные, а не гипотетические возможности инвестирования в развитие дронов. Для аналитических расчетов выбрана модель потока реальных денег по каждому проекту.

Прибыль, полученная от реализации одного проекта, может направляться на финансирование других. Предполагается, что структура показателей проектов остается неизменной, если их реализация начинается в 2021 г.

Необходимо учесть спросовые, финансовые и временные ограничения.

Таблица 1

Индивидуальные финансово-экономические показатели проектов, тыс. руб.

Показатели	Вариант 1 (перевозки дронами)	Вариант 2 (перевозки авиа- и наземным транспортом)
2021 г.		
Объем перевозок, млн.руб.	3 750	11 793
Полные текущие издержки, включая топливо, млн.руб.	2 911	9 384
Чистая прибыль от реализации проекта	481	1 434,58
Доходность, %	12,83	12,16
2022 г.		
Объем перевозок, млн.руб.	4 400	13 431
Полные текущие издержки, включая топливо, млн.руб.	3 410	11 040,54
Чистая прибыль от реализации проекта	1 056	1 394,55
Доходность, %	24,00	21,06
2023 г.		
Объем перевозок, млн.руб.	4 991	15 717,9
Полные текущие издержки, включая топливо, млн.руб.	4 269	12 493,09
Чистая прибыль от реализации проекта	1 425	1 959,73
Доходность, %	28,54	30,47

Примечание: составлено авторами.

Спросовые ограничения установлены при расчете индивидуальных показателей грузоперевозок в Арктической зоне в соответствии с объемами фактически имеющихся потребностей. Дополнительный спрос возможен, увеличение спроса происходит каждый год.

В качестве индикаторов оценки каждого проекта выбраны чистый дисконтированный доход (ЧДД) и дисконтированный срок окупаемости. Эти показатели учитывают временную стоимость денег и позволяют оценить эффективность проекта в абсолютном и временном аспекте.

При определении потребности в источниках

финансовых ресурсов учтено, что для проекта развития грузоперевозок в Арктической зоне на основе дронов требует значительных инвестиций, а парк транспорта для авиа- и наземных перевозок уже существует. Также учтено формирование оборотного капитала в виде авансовых платежей за топливо, при этом беспилотные летательные аппараты требуют меньшего количества топлива (несмотря на их большое количество), а значит – и меньшего оборотного капитала (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление потребности в инвестиционных ресурсах и объема потенциальных источников финансирования, млн. руб.

Показатели	май 2021 г.	июнь 2021 г.
Проект 1		
Инвестиции в основной капитал	4 200	-
Инвестиции в оборотный капитал	150	315
Проект 2		
Инвестиции в основной капитал	-	-
Инвестиции в оборотный капитал	850	1 540

В таблице 3 приведены итоговые значения показателей эффективности проектов.

Таблица 3

Оценка эффективности проектов, млн. руб.

Показатели	Вариант 1 (перевозки дронами)	Вариант 2 (перевозки авиа- и наземным транспортом)
Вариант финансирования 1		
Годовой экономический эффект	3 465	4 162
ЧДД	5 600	5 324,55
Срок окупаемости, лет	0,19	2,70
Вариант финансирования 2		
Годовой экономический эффект	5 443	3 739
ЧДД	7 365	4 601,10
Срок окупаемости, лет	0,14	3,13

Несмотря на то, что оба проекта эффективны, по критерию срока окупаемости и ЧДД проект 2 может быть принят, поскольку для машиностроения период возврата денежных средств, составляющий около трех лет, приемлем.

Интересно рассмотреть сочетание разного участия проектов в общей системе логистики доставки грузов в Арктической зоне. Поскольку нас интересует эффективность в целом, определим, какое сочетание вариантов финансирования предпочтительно по критерию максимума ЧДД (табл. 4).

Оптимальным видится следующий вариант выполнения грузоперевозок в Арктической зоне: 50% перевозится БПЛА, 50% – перевозка традиционными видами транспорта.

Таким образом, в условиях развития БПЛА в сфере логистики Арктической зоны необходимо их использование параллельно с авиа- и наземными видами транспорта. Расчеты показали, что это будет эффективно с экономической точки зрения.

3. Международное сотрудничество в области беспилотного транспорта в Арктической зоне

Примером крупного международного проекта, направленного на развитие транспортных коммуникаций в Арктике, является проект Европейского союза «Северное измерение», охватывающий страны Северной Европы, Балтии, а также Россию. Проект сфокусирован на конкретных сферах сотрудничества. Такое взаимодействие полезно не только для стран данного региона, но и для Европы в целом.

Таблица 4

Расчет эффективности портфеля, млн. руб.

Показатели	Вариант 1 (перевозки дронами)		Вариант 2 (перевозки авиа- и наземным транспортом)	
	Вариант 1 (25% от общего объема грузоперевозок АЗ)	Вариант 2 (50% от общего объема грузоперевозок АЗ)	Вариант 1 (75% от общего объема грузоперевозок АЗ)	Вариант 2 (50% от общего объема грузоперевозок АЗ)
Годовой эконом. эффект проекта	3 465	5 443	3 964	3 275
Сочетание вариантов по проектам	+		+	
ЧДД портфеля	7 429			
Сочетание вариантов по проектам	+		+	
ЧДД портфеля	8 718			

Интересным примером международного сотрудничества в области логистики и транспорта является проект «Развитие логистики в Баренцевом транспортном коридоре», посвященный вопросам развития транспорта и региональной логистики в Мурманской области. Продолжением этой работы стал проект «Баренц логистика-2», направленный на повышение профессиональной компетенции в области логистики, развитие логистических «ноу-хау» и расширение цепи поставок в Баренц-регионе.

Не менее перспективен проект «Северный воздушный мост», предусматривающий организацию авиационных маршрутов из Азии в Северную Америку через Арктику [9]. В рамках данного проекта предполагается развивать транспортно-логистический сектор в Арктической зоне как сервисный сектор в рамках реализации крупных, прежде всего, энергетических международных проектов [10].

Наибольший интерес с точки зрения развития беспилотных устройств в логистике арктической зоны представляет собой проект INTERACT [11, 12, 13], который объединяет международные наземные исследования и мониторинг в Арктике. INTERACT – это инфраструктурный проект, включающий в настоящее время 89 наземных полевых баз в Северной Европе, России, США, Канаде, Гренландии, Исландии, Фарерских островах и Шотландии, а также станции в северных альпийских

районах. В рамках проекта INTERACT уже сейчас активно используются дроны.

Беспилотные летательные аппараты используются для масштабирования с исследовательских станций. Основная цель использования дронов состоит в том, чтобы повысить осведомленность исследователей и руководителей исследовательских станций о беспилотных технологиях и датчиках, а также ознакомить промышленность с инновационными потенциальными видами применения, требующими разработки беспилотных летательных аппаратов и датчиков для Арктической зоны. Известно, что для транспортировки и перевалки грузов составляются технологические карты и технологические графики. Они подробно описывают эти процессы и являются эффективным средством регулирования работы состава. Тем не менее, дроны со средствами видеозаписи могли бы быть полезными для оценки реального выполнения описанного процесса, а также качества построенных схем. Информация, собранная таким образом, могла бы существенно повлиять на улучшение логистических процессов.

В рамках проекта происходит повышение уровня знаний руководителей станций о беспилотных технологиях и действующем законодательстве по использованию беспилотных летательных аппаратов, определение БПЛА-датчиков специально для Арктики исследований или в настоящее время недостаточно представлены в арктических и других труднодоступных зонах, а также формируется схема наилучшей практики использования беспилотников в Арктике исследовательских станций. В конечном счете, такое сотрудничество между представителями науки и соответствующими производителями дронов должно привести к созданию новых технологий в производстве и новых процессов в логистике в Арктической зоне.

4. Проблемы и перспективы развития беспилотных перевозок в Арктической зоне

Развитие коммерческой деятельности, повышение требований к скорости и качеству доставки в Арктической зоне – все это приводит к повышению спроса на услуги беспилотных авиаперевозок на данной территории. Использование в логистической отрасли Арктической зоны современных технологий обеспечит высокую скорость выполнения необходимых работ, сокращение трудовых затрат, которые приведут к повышению конкурентоспособности экономики.

В связи с растущими объемами логистических потоков в Арктической зоне использование дронов представляется весьма интересным и перспективным проектом.

Так, Минприроды направило в правительство комплексный план «Реализация минерально-сырьевого и логистического потенциала Арктики». В него входят 118 проектов, направленных на развитие, освоение и переработку минерально-сырьевой базы Арктической зоны РФ, и соответствующее инфраструктурное обеспечение [1]. Документ учитывает деятельность в области судостроения, экологии, туризма, разных отраслях промышленности, а также иных сферах. До 2030 года планируется привлечь около 10,5 триллиона рублей внебюджетных инвестиций.

Проанализирован возможный объем грузовой базы Северного морского пути к 2024 году, формируемой за счет реализации проектов освоения минерально-сырьевой базы. При сохранении инерционного сценария развития отрасли уровень грузопотока может составить около 60 миллионов тонн к 2024 г., при реализации прорывного сценария – 77 миллионов тонн. Уже сегодня основу добытых грузов составляют СПГ, нефть, конденсат, твердые полезные ископаемые, уголь. Увеличение прогнозного объема грузопотока по СМП (северному морскому пути) возможно при своевременном вводе в действие всех планируемых проектов (Таймырский угольный бассейн, Пайяхское нефтяное месторождение), а также реализации ряда перспективных инфраструктурных проектов (в частности, подключение к СМП Сузунского, Тагульского, Лодочного нефтяных месторождений) [6].

Основная проблема российской Арктики – проблема связанности территорий. Есть компоненты, связанные с ледоколами, а есть компоненты, связанные с вертолетами в арктическом исполнении. В 2016 году в России было запущено несколько проектов, связанных с малой авиацией, которая является «ключом для освоения таких территорий» [13, 14]. В отношении вопроса доставки грузов дронами, речь идет о временных рамках реализации проекта порядка 10-15 лет, и касается только лишь доставки продуктов при помощи дронов, процессы освоения Арктики еще в стадии «пуска».

Заключение

Итак, на сегодня наблюдается тенденция серьезного изменения в индустрии логистики Арктической зоны. Логистической инновацией, которая сейчас наиболее прогрессивно развивается является использование беспилотных летательных аппаратов – дронов, которые с каждым днем становятся все более развиты. Это свидетельствует о росте количества БПЛА в различных сферах освоения Арктической территории. БПЛА могут изменить «завтрашнюю» логистику, добавив новую форму экспресс-доставки через тщательно скоординированные воздушные сети. Следовательно, применение дронов в различных сферах, особенно в логистике, однозначно является инновационным решением. Использование элементов искусственного интеллекта и робототехники становится повседневным делом в жизни людей – это неотвратимый процесс.

Освоение Арктики требует от государства и компаний решения комплекса задач, предполагающих разработку новых эффективных технологий, совершенствование методов организации логистики удаленных объектов и движения транспортных средств при минимизации воздействия на экосистему региона. Хорошо спланированная транспортно-логистическая инфраструктура позволит реализовать потенциал и повысить конкурентоспособность региона.

Используемые сейчас функции транспортировки и мониторинга – это только часть возможностей, которые открываются при использовании малых беспилотных аппаратов в Арктической зоне. Их техническое обеспечение сейчас позволяет строить алгоритмы автономного полета по заранее заданной

траектории без участия оператора или в реальном времени строить трехмерную модель окружения. Учитывая, что в рамках состава использования таких устройств будет нормироваться внутренними правилами, они не требуют много ресурсов для своей

работы и безопаснее, чем большинство технических средств наземной и воздушной логистики, дроны могут найти свою нишу в логистических процессах Арктики и качественно их улучшить.

Литература

1. Березина Е. В развитие логистики Арктики предложили инвестировать 10,5 трлн рублей // ТАСС от 13.03.2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/6212082> (дата доступа: 22.03.2021).
2. Михов О.М., Королев О.А., Ошев И.А. Особенности развития транспортно-логистической инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН. – Т.2. – С. 48–53.
3. Веретенников Н. П. Региональная организация транспортно-логистической системы в Арктике // Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузгинские чтения. – 2018. – С. 14-15.
4. Об итогах работы Минприроды России и подведомственных ему федеральных служб и федеральных агентств в 2018 г. и приоритетных задачах на 2019 г. Постановление №1 от 9 августа 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата доступа: 21.03.2021).
5. Сайт проекта INTERACT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eu-interact.org/> (дата доступа: 21.03.2021).
6. Форум Арктика – территория диалога // ТАСС от 30.03. 2017 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika> (дата доступа: 22.03.2021).
7. Малыгин И.Г., Макоско А.А., Цыганов В.В. и др. Инфраструктура Сибири, Дальнего Востока и Арктики. Состояние и три этапа развития до 2050 года. – М.: ИПТ РАН, 2019. – 465 с.
8. Михов О.М., Шаталова Н.В. Применение методов машинного обучения в российской логистике // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2020. –Т.1. – С. 83–86
9. Akshat Sharma. How Future Delivery Drones Will Deliver Your Packages [Электронный ресурс] / Akshat Sharma. – 2019. – Режим доступа: <https://jungleworks.com/how-future-delivery-drone-will-deliver-your-packages>. (дата доступа: 21.03.2021).
10. Borremans, A., Dubgorn, A., Grashenko, B., and Iliashenko, O., 2019. Formation of requirements to telemedicine system services taking into account specifics of the Arctic Zone of RF. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 497.1. – С. 12-25.
11. Фадеев А. Профессионалы об Арктике // Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН: публикация от 04.04.2014г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pro-arctic.ru/6212082> (дата доступа: 22.03.2021).
12. Шаталова Н.В. Развитие транспортной отрасли как основополагающей при решении проблем стратегического и экономического характера // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2017. – Т.1. – С. 230–233.
13. Сазанов А.М., Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Асаул М.А., Титов В.О., Ващук А.Э., Буров И.А. О разработке интеллектуальной системы видеомониторинга морского пространства арктического региона // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 2-2 (44). – С. 116–128.
14. Riley Panko. Drone Delivery: Benefits and Challenges [Электронный ресурс] / Riley Panko. – 2020. – Режим доступа: <https://clutch.co/logistics/resources/drone-delivery-statistics-benefits-challenges> (дата доступа: 21.03.2021).

References

1. Berezina E. V razvitie logistiki Arktiki predlozhili investirovat' 10,5 trln rublej // TASS ot 13.03.2019 g. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://tass.ru/ekonomika/6212082> (data dostupa: 22.03.2021).
2. Mikhov O.M., Korolev O.A., Oshev I.A. Osobennosti razvitiya transportno-logisticheskoy infrastruktury v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii // Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2020: materialy YUbilejnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – SPb.: IPT RAN. – T.2. – S. 48–53.
3. Veretennikov N. P. Regional'naya organizaciya transportno-logisticheskoy sistemy v Arktike // Sever i Arktika v novoj paradigme mirovogo razvitiya. Luzginskie chteniya. – 2018. – S. 14-15.
4. Ob itogah raboty Minprirody Rossii i podvedomstvennyh emu federal'nyh sluzhb i federal'nyh agentstv v 2018 g. i prioritetnyh zadachah na 2019 g. Postanovlenie №1 ot 9 avgusta 2019 g. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.consultant.ru> (data dostupa: 21.03.2021).
5. Sajt proekta INTERACT [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://eu-interact.org/> (data dostupa: 21.03.2021).
6. Forum Arktika – territoriya dialoga // TASS ot 30.03. 2017 g. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://tass.ru/ekonomika> (data dostupa: 22.03.2021).
7. Malygin I.G., Makosko A.A., Cyganov V.V. i dr. Infrastruktura Sibiri, Dal'nego Vostoka i Arktiki. Sostoyanie i tri etapa razvitiya do 2050 goda. – M.: IPT RAN, 2019. – 465 s.
8. Mikhov O.M., SHatalova N.V. Primenenie metodov mashinnogo obucheniya v rossijskoj logistike // Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. – 2020. –Т.1. – С. 83–86/
9. Akshat Sharma. How Future Delivery Drones Will Deliver Your Packages [Электронный ресурс] / Akshat Sharma. – 2019. – Режим доступа: <https://jungleworks.com/how-future-delivery-drone-will-deliver-your-packages>. (дата доступа: 21.03.2021).

10. Borremans, A., Dubgorn, A., Grashenko, B., and Iliashenko, O., 2019. Formation of requirements to telemedicine system services taking into account specifics of the Arctic Zone of RF. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 497.1. – С. 12-25.
11. Fadeev A. Professionalny ob Arktike // Institut ekonomicheskikh problem im. G.P. Luzina Kol'skogo nauchnogo centra RAN: publikaciya ot 04.04.2014g. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://pro-arctic.ru/6212082> (data dostupa: 22.03.2021).
12. SHatalova N.V. Razvitie transportnoj otrasli kak osnovopolagayushchej pri reshenii problem strategicheskogo i ekonomicheskogo haraktera // Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. – 2017. – Т.1. – С. 230–233.
13. Sazanov A.M., Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Asaul M.A., Titov V.O., Vashchuk A.E., Burov I.A. O razrabotke intellektual'noj sistemy videomonitoringa morskogo prostranstva arkticheskogo regiona // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2019. – № 2-2 (44). – С. 116–128.
14. Riley Panko. Drone Delivery: Benefits and Challenges [Электронный ресурс] / Riley Panko. – 2020. – Режим доступа: <https://clutch.co/logistics/resources/drone-delivery-statistics-benefits-challenges> (дата доступа: 21.03.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наталья Викторовна Шаталова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13, e-mail: shatillen@mail.ru

Олег Михайлович Михов, младший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 e-mail: mikhas95@gmail.ru

Ольга Владимировна Бородина, научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 e-mail: borodinaov@gmail.ru

Natalia V. Shatalova, Phd (Eng), Lider researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: shatillen@mail.ru

Oleg M. Mikhov, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: mikhas95@gmail.ru

Olga V. Borodina, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. e-mail: borodinaov@gmail.ru

Поступила в редакцию: 20.02.2021

Принята к публикации: 15.05.2021

Интеллектуальная поддержка принятия решений в логистических системах

Ю.М. Искандеров¹ e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru, А.С. Свистунова¹ e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru,
 Д.С. Хасанов¹ e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru, А.С. Чумак¹ e-mail: chumak@nst-spb.ru

¹Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр РАН

Аннотация. В статье изложен подход, обеспечивающий реализацию комплексных логистических технологий на основе координации перевозок и процедур обработки грузов в интересах выполнения стратегии доставки «точно в срок» и «от двери до двери». Важнейшим фактором, обеспечивающим достижение высокого уровня качества управления транспортно-технологическими процессами, является формирование и использование релевантной системы интеллектуальной поддержки принятия решений, сформированной с учетом достижений новых информационных технологий. Представлены основные классы задач, решаемые при управлении логистическими системами. Отмечено, что система интеллектуальной поддержки принятия решений позволяет осуществлять планирование, управление и контроль всего логистического процесса в режиме реального времени с учетом требования минимизации используемых различного рода ресурсов. Ключевым элементом указанной системы является база знаний, содержащая формализованные знания предметной области. Дано представление мультиагентной платформы системы интеллектуальной поддержки принятия решений, показано ее использование при выборе комплексных логистических технологий. Для иллюстрации подхода была рассмотрена конкретная функциональная задача по принятию решения о выборе вида транспорта исходя из требуемых сроков доставки продукции. Отмечены преимущества системы интеллектуальной поддержки в выборе эффективных комплексных логистических технологий.

Ключевые слова: система интеллектуальной поддержки принятия решений, логистическая система, комплексная логистическая технология, база знаний, мультиагентная платформа, интеллектуальный агент, управление.

Intelligent decision support in logistics systems

Yury M. Iskanderov¹ e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru, Alexandra S. Svistunova¹ e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru, Dmitry S. Khasanov¹ e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru,
 Alexandr S. Chumak¹ e-mail: chumak@nst-spb.ru

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The article outlines an approach that ensures the implementation of complex logistics technologies based on the coordination of transportation and cargo handling procedures in order to fulfill the delivery strategy "just in time" and "door to door". The most important factor ensuring the achievement of a high level of quality management of transport and technological processes is the formation and use of a relevant system of intelligent decision support, formed taking into account the achievements of new information technologies. The main classes of problems solved in the management of logistics systems are presented. It is noted that the system of intelligent decision-making support allows planning, management and control of the entire logistics process in real time, taking into account the requirement to minimize the various kinds of resources used. The main element of this system is the knowledge base containing formalized knowledge of the subject area. The multi-agent platform of the intelligent decision support system is presented; its use is shown when choosing complex logistics technologies. To illustrate the approach, a specific functional task for making a decision on the choice of a mode of transport based on the required delivery time of products was considered. The advantages of the system of intellectual support in the selection of effective complex logistics technologies were noted.

Key words: intelligent decision support system, logistics system, complex logistics technology, knowledge base, multiagent platform, intelligent agent, control.

Введение

В течение последних лет достигнут существенный прогресс в развитии теоретической и практической базы логистического менеджмента. В многочисленных трудах отечественных и зарубежных ученых, в том числе и [1-8], подробно исследованы вопросы развития логистики в целом, а также отдельных ее функциональных областей, моделей и методов. Между тем, анализ современного состояния исследований в логистике показывает, что процесс создания комплексной информационной сети с участием поставщиков, производителей, торговых организаций и клиентов является чрезвычайно сложным организационно-технологическим процессом и требует тщательной предварительной подготовки, в первую очередь, разработки соответствующего научно-методического обеспечения. Известные информационные

технологии, такие как CORBA, J2EE (Sun), Dot.Net (Microsoft) и др., не охватывают в значительной степени глубину процессов принятия решений в логистическом менеджменте. Необходимо отметить, что имеется недостаточная проработка методов и принципов управления логистическими функциями с использованием интеллектуальных систем для решения актуальных и перспективных задач логистического менеджмента. Таким образом, настоящая статья посвящена проблеме обеспечения управления логистическими системами с использованием интеллектуальных информационных технологий на основе реализации концепций системного моделирования и интеграции знаний применительно к рассматриваемой предметной области.

К транспортно-логистическим процессам предъявляются жесткие требования в интересах реализации стратегии доставки грузов «точно в срок»

и «от двери до двери» при минимизации общих затрат. В этих условиях формирование комплексных логистических технологий (КЛТ) на основе координации перевозок и процедур обработки грузов, связывающей всех участников рынка транспортных услуг, обусловлено необходимостью совершенствования существующих процессов управления в интересах повышения качества предоставляемых услуг, и соответственно, повышения конкурентоспособности. Особое внимание уделяется надежности функционирования используемых транспортных схем. Ожидаемый экономический эффект от реализации КЛТ заключается в получении дополнительной прибыли за счет увеличения объемов перевозок и ускорения доставки грузов. На рис.1 представлены основные классы задач, решаемые при управлении логистическими системами (ЛС).



Рис.1. Основные классы задач, решаемые при управлении логистической системой.

Отличительной особенностью ЛС является их распределенность в пространстве, иерархически-сетевой принцип организации управления. Поэтому решение комплекса задач транспортной логистики характеризуется многовариантностью построения новых бизнес-процессов и моделированием сетевых организаций. Учитывая указанные особенности, важнейшим фактором, обеспечивающим достижение высокого уровня качества управления транспортно-технологическими процессами является формирование и использование релевантной системы интеллектуальной поддержки принятия решений (СИППР), сформированной с учетом достижений новых информационных технологий [9-13].

Система интеллектуальной поддержки принятия решений в логистических системах.

СИППР представляет собой программно-техническую систему, построенную на основе методов инженерии знаний и позволяющую решать на ЭВМ сложные задачи, связанные с переработкой информации на семантическом уровне. В общем случае, СИППР состоит из базы знаний, системы логического вывода, системы объяснения, системы интерфейсов с пользователем. Необходимо обратить внимание на два принципиально важных аспекта, заложенных в идее создания и внедрения

СИППР и ее элементов, и определяющих их значение для решения задач при управлении ЛС.

Во-первых, СИППР ориентирована на такую последовательность обработки информации, которая используется человеком при принятии решений в своей предметной области. Эта последовательность обработки информации включает следующие этапы:

- приобретение и организация знаний, т.е. изучение предметной области с целью получения ее адекватного описания, ориентированного на решение определенного класса задач;
- представление знаний, т.е. придание описанию ПО формы, удобной для получения выводов на основе имеющейся информации;
- логический вывод, т.е. выработка множества альтернативных решений;
- принятие решений, т.е. выбор из множества альтернативных решений оптимальных по заданному критерию.

Во-вторых, СИППР предоставляет средства для реализации на ЭВМ всех перечисленных этапов обработки информации, за некоторым исключением первого этапа, поскольку приобретение знаний является задачей человека-эксперта и связано с вполне определенной познавательной деятельностью.

Следовательно, СИППР позволяет реализовать автоматизированное планирование, управление и контроль всего логистического процесса в режиме реального времени с учетом требования минимизации используемых различного рода ресурсов(рис.2).

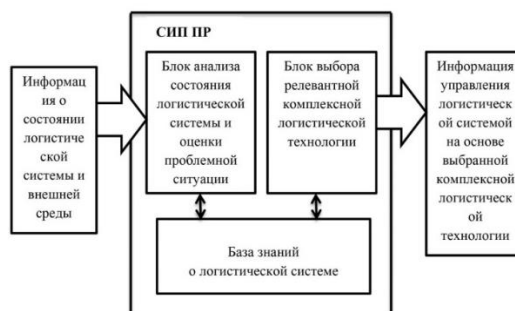


Рис.2. Система интеллектуальной поддержки принятия решений в логистических системах.

Процесс функционирования указанной СИППР осуществляется следующим образом. На основе поступающей информации о состоянии ЛС и внешней среды выполняется анализ этого состояния и оценка проблемной ситуации с использованием существующих знаний. В результате анализа и оценки, с учетом определенных (заданных) правил и критериев выбирается (формируется) КЛТ, на основе которой реализуется управление ЛС. Следует отметить, что в каждой отдельной ситуации СИППР пользуется знаниями и правилами, предписанными именно для данного случая, не учитывая огромное число других факторов в постоянно меняющемся реальном мире.

Ключевым элементом такой СИППР является база знаний (БЗ), в которой концентрируется вся необходимая информация (содержание электронных

информационных ресурсов, печатных изданий, рукописных материалов, неформальные знания и опыт экспертов и др.), внутренняя форма которой задается специальными средствами обработки знаний, а внешняя форма обеспечивает ее представление в удобном и привычном для пользователя виде [12,13]. БЗ СИППР характеризуется рядом нетривиальных свойств, среди которых выделим следующие:

- пользователь не обязан обладать сведениями о структуре БЗ, представлении, манипулировании знаниями;
- обращение к БЗ может осуществляться на языке, отражающем лишь семантические стороны запроса;
- отображение предметной области в БЗ осуществляется с учетом пространственно-временных отношений;
- БЗ обеспечивает индивидуальное развитие системы;
- БЗ обеспечивает работу СИППР с противоречивыми, неполными и неточными знаниями (при их наличии).

Исходя из выделенных свойств, БЗ должна удовлетворять согласованным требованиям, учитывающим характер и условия применения, а также специфику предметной области логистического менеджмента. Выполнение требований позволит сформировать БЗ, обеспечивающую эффективное решение практических задач управления ЛС. Очевидно, что необходимые знания в БЗ формируют многоуровневую иерархическую структуру, причем глубина уровня иерархии непосредственно зависит от уровня сложности решаемой задачи. На рис.3 представлен фрагмент верхнего уровня БЗ СИППР в ЛС.

В настоящее время существует множество частных подходов к формализации и исследованию проблем анализа и синтеза интеллектуальных информационных технологий в ЛС. Данные подходы, как правило, базируются на количественных моделях, описывающих рассматриваемую предметную область. К указанным моделям, в первую очередь, могут быть отнесены модели, используемые в исследовании операций, теории управления запасами, математической статистики.

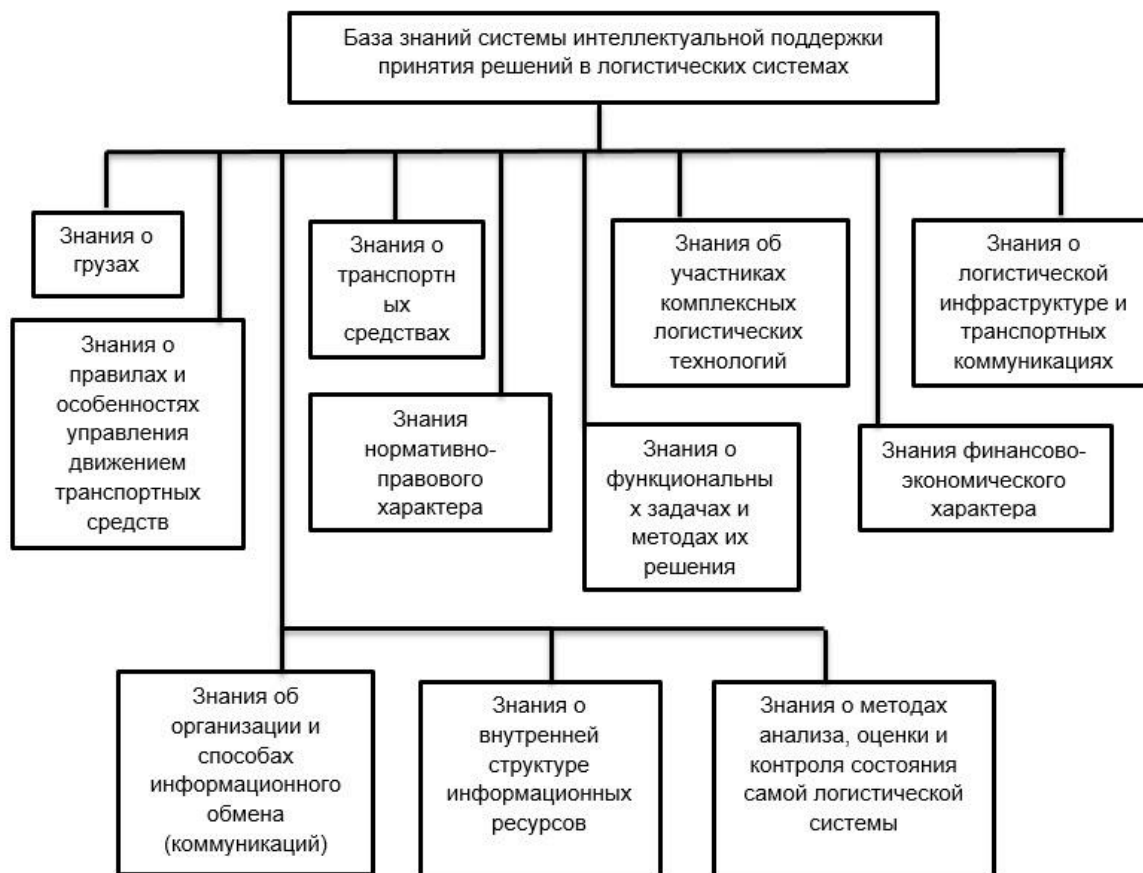


Рис.3. Фрагмент верхнего уровня базы знаний системы интеллектуальной поддержки принятия решений в логистических системах.

Однако, как показывает системный анализ, решение реальных задач управления в ЛС базируется в большей степени на разнородных и распределенных декларативных и процедуральных знаниях, и главная проблема состоит как раз в интеграции указанных знаний как на уровне бизнес-процессов, так и на уровнях соответствующих

приложений и аппаратно-программных платформ с использованием новых интеллектуальных технологий и инструментальных средств.

С учетом вышеизложенного, необходимо отметить, что эффективным средством реализации СИППР является построение мультиагентных инфраструктур, обеспечивающих адаптацию

инструментальных средств и информационных систем к изменяющимся условиям ведения бизнеса [10,11,13,15]. Принцип действия мультиагентных управляющих систем основывается на декомпозиции общей задачи на ряд локальных задач, возлагаемых на агентов системы, распределением этих задач между агентами, планировании коллективного поведения агентов, координации взаимодействия агентов на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешения конфликтных ситуаций.

Особенность мультиагентных систем состоит в использовании онтологий - специализированных баз знаний о предметной области, которые используются в работе агентов. Онтология описывает классы объектов (например, ресурсы, проекты, задачи, заказы и планы) и их атрибуты, отношения и процессы. Отделяя знания о предметной области от системного кода, онтология не только позволяет внесение изменений в систему специалистам без навыков программирования, но и дает возможность вносить эти изменения "на лету" - без прерывания работы системы. Знания, хранимые в онтологии, используются программными агентами в процессе переговоров и принятия решений. Именно умение пользоваться знаниями, описанными в онтологии, и делает программных агентов интеллектуальными.

Преимущество мультиагентных технологий заключается в принципиально новом методе решения задач. В отличие от классического способа, когда проводится поиск некоторого четко определенного (детерминированного) алгоритма, позволяющего найти наилучшее решение проблемы, реализация мультиагентных технологий позволяет получать решение автоматически в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленных программных модулей — агентов. Программный агент (ПА) - ключевой элемент мультиагентных систем, который представляет собой специальный объект, способный анализировать ситуацию, принимать решения, коммуницировать с другими агентами, вести переговоры друг с другом для разрешения возникающих конфликтов и затем информировать систему и пользователя о результатах своих действий.

Обычно, агент обладает набором из следующих свойств:

- адаптивность: агент обладает способностью обучаться;
- автономность: агент работает как самостоятельная программа, ставя себе цели и выполняя действия для достижения этих целей;
- коллаборативность: агент может взаимодействовать с другими агентами несколькими способами, например, играя роль поставщика/потребителя информации или одновременно обе эти роли;
- способность к рассуждениям: агенты могут обладать частичными знаниями или механизмами вывода, например, знаниями, как приводить данные из различных источников к одному виду;
- коммуникабельность: агенты могут общаться с другими агентами;

- мобильность: способность к передаче кода агента с одного сервера на другой.

Мультиагентные системы (МАС) используются для решения как технологических задач (моделирование, имитация, спецификация), так и функциональных задач прикладного характера (планирование, управление, учет и отчетность, интеграция). Мультиагентная платформа фактически является семантической и коммуникационной средой, отражающей правила ведения бизнеса и взаимодействие его участников. В качестве базовой модели класса интеллектуального агента IA используется модель [16]:

$$IA = \langle LA, CM, BM, O \rangle,$$

где

LA — множество информационных атрибутов (идентификатор, имя, местоположение и т.д.);

CM — коммуникационная модель (язык и методы для общения);

BM — поведенческая модель (способы обработки сообщений);

O — множество онтологий.

На рис.4 дано общее представление мультиагентной платформы системы интеллектуальной поддержки принятия решений.

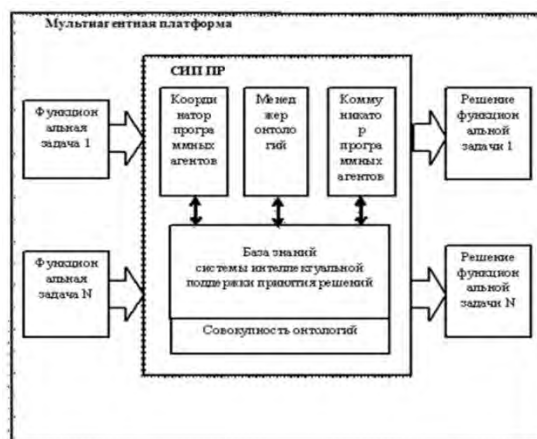


Рис.4. Мультиагентная платформа системы интеллектуальной поддержки принятия решений.

С учетом изложенного подхода, рассмотрим в качестве примера частную функциональную задачу принятия решения по выбору вида транспорта для доставки продукции исходя из требуемых сроков доставки. Напомним, что одним из важнейших принципов интегрированной логистики является принцип доставки грузов «точно в срок». Невыполнение указанного принципа влечет за собой не только экономические, но и репутационные риски и потери. Поэтому при формировании эффективной КЛТ выбор соответствующего вида транспорта для вполне определенных (заданных) условий играет очень важную роль. На рис.5 представлен вариант решения указанной функциональной задачи, реализованной на основе мультиагентной платформы СИП ПР.

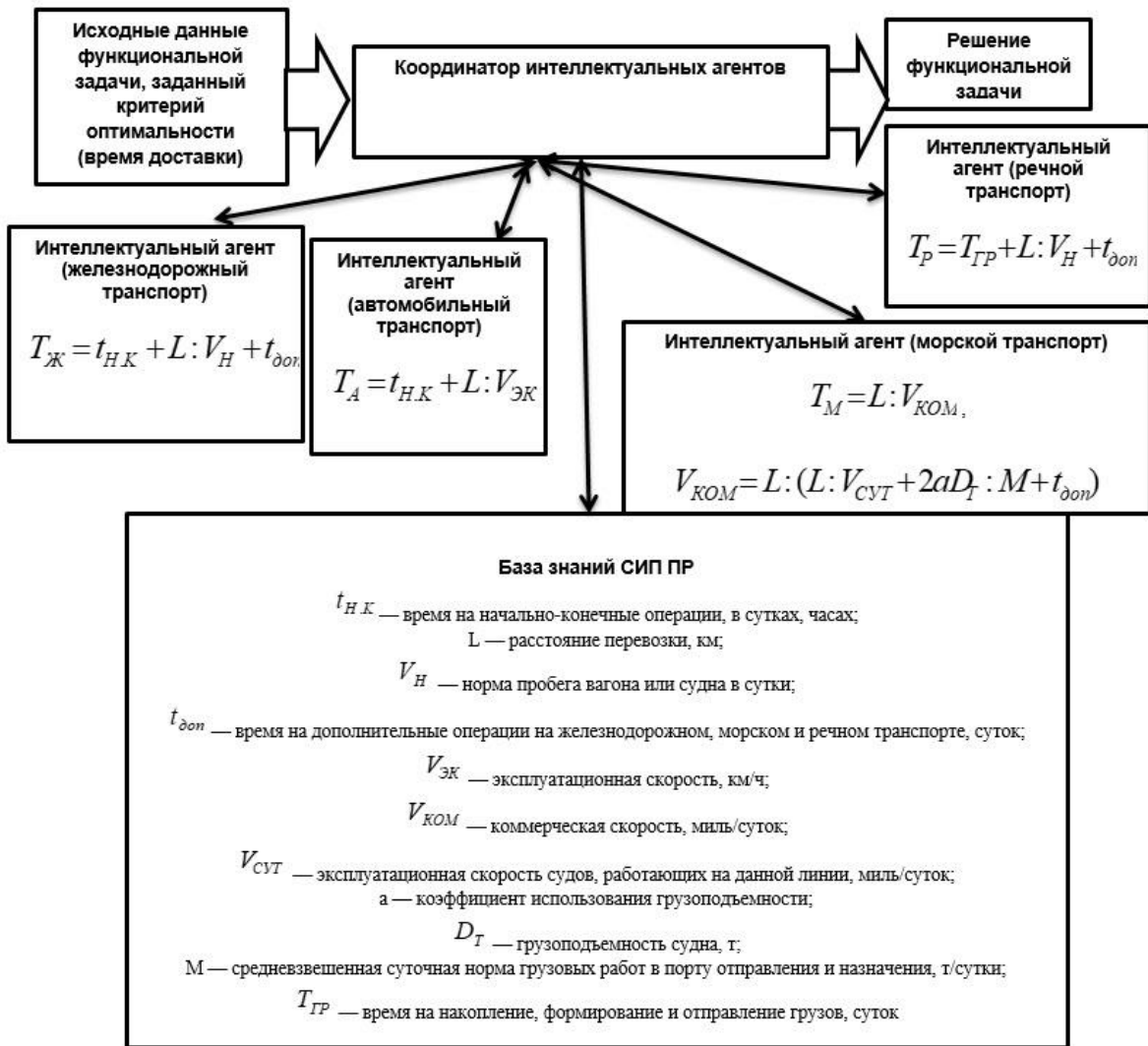


Рис. 5. Вариант структуры взаимодействия интеллектуальных агентов при решении функциональной задачи принятия решения по выбору вида транспорта для доставки продукции исходя из требуемых сроков доставки.

В БЗ СИП ПР для каждого вида транспорта имеется необходимая информация для определения возможных сроков доставки, которую используют интеллектуальные агенты (ИА) для выполнения расчетов, обмена полученной информацией и подготовки требуемого решения в соответствии с заданным критерием оптимальности: $T_{доставки} = \min\{T_i\}$, $i=1, n$. Каждый ИА определяет время доставки своим видом транспорта, полученная информация от них поступает координатору ИА, который реализует взаимодействие и коммуникацию между ИА и БЗ. В итоге, координатор ИА предлагает решение, удовлетворяющее критерию выполнения задачи.

Следует отметить, что получение необходимого решения может иметь итерационный характер и указанный выбор, безусловно, зависит от стратегии предприятия, при этом учитываются: размещение производства, источники сырья и потребители; технико-экономические особенности различных видов транспорта; оптимальный уровень запасов; вид упаковки, стабильность и надежность данного способа транспортировки.

Приведенный пример решения частной задачи демонстрирует возможности для аналогичного

решения любой задачи при формировании КЛТ. Применение СИП ПР при реализации процессов планирования, управления и контроля позволяет существенно и обоснованно влиять на повышение эффективности функционирования ЛС. При выборе КЛТ всегда определяется наилучшая (оптимальная) комбинация затрат, при которой их общая величина будет наименьшей даже в условиях, когда один из важнейших компонентов (транспортные расходы) будет находиться на относительно высоком уровне. При решении конкретных задач оптимизации устанавливаются конкретные цели – максимизация прибыли, минимизация логистических затрат, поддержание уровня обслуживания, обеспечение сроков поставок и т.д. [17, 18]. Опираясь на свойства и преимущества использования мультиагентной платформы, СИП ПР при формировании КЛТ обеспечивает выбор решения с минимальными затратами на его реализацию.

При выборе такого решения определение затрат производится с учетом разделения их на две большие группы:

- затраты, связанные с организацией материальных потоков внутри предприятия (затраты, связанные с выполнением таких функций как

эксплуатация заводских складов различного назначения; формирование и содержание запасов; организация внутрипроизводственных перевозок; подбор товаров для отправки и их упаковка; оформление документации; выполнение отдельных финансовых операций);

- затраты, осуществляемые в процессе реализации продукции

(расходы на перевозки продукции потребителю; на погрузо-разгрузочные работы; затраты, связанные с нахождением товара в пути; затраты, связанные со страхованием грузов; расходы по формированию и содержанию запасов у сбытовых и торгово-закупочных организаций; «издержки дефицита», представляющие собой дополнительные расходы, возникающие в связи с ограниченностью в какой-либо период тех или иных материальных ресурсов; расходы, связанные с транспортно-экспедиторскими функциями; административные расходы, грузовые сборы и другие виды издержек).

Основным критерием оптимальности КЛТ, объединяющим (интегрирующим) используемые критерии оптимальности решения частных функциональных задач, в данном случае выступает уровень прибыли предприятия. Прибыль определяет количественную оценку эффективности деятельности предприятия, но на уровень прибыли, естественным образом, влияют также и другие факторы производственной, хозяйственной, финансовой деятельности предприятия, и выделить точный вклад логистических операций в общую сумму прибыли весьма затруднительно. Поэтому в качестве интегрального критерия оптимальности КЛТ возможно и целесообразно применение показателя минимума приведенных совокупных затрат:

$$C_{\Pi} + C_{об} \rightarrow \min$$

где

C_{Π} – издержки производства;

$C_{об}$ – издержки обращения.

Эффективность товародвижения, организуемого с использованием соответствующей КЛТ, может быть определена по формуле

$$R = \frac{B - C_{\Pi}}{C_{\Pi}}$$

где

R – норма прибыли процесса товародвижения;

B – торговая выручка предприятия;

C_{Π} – затраты на товародвижение.

При определении показателей эффективности ЛС затраты, связанные с транспортировкой грузов, рассматриваются либо как эксплуатационные расходы транспортных подразделений предприятий или транспортных компаний, занятых перевозками, либо если предприятие привлекает для перевозки продукции внешние транспортные организации, расходы на транспортировку приобретают характер транспортных тарифов.

В настоящее время, особенно при осуществлении международной транспортной деятельности, все больший вес при оценке качества и эффективности выполняемых грузоперевозок приобретает такой показатель как уровень логистического обеспечения, который является количественной характеристикой соответствия фактических значений показателей качества и количества логистических услуг

оптимальным или теоретически возможным значениям этих показателей [18]. В связи с этим необходимо отметить, что СИППР позволяет реализовать подход, основанный на системном анализе показателей оценки качества КЛТ, и выбрать вариант в максимальной степени обеспечивающий удовлетворение требований участников рынка транспортных услуг. Иначе говоря, СИППР позволяет сформировать наиболее предпочтительные решения по выбору способов перевозок и видов транспорта, по определению экономичных размеров отгрузок; по интеграцию процессов складирования, транспортировки и формирования грузов и, в целом, по реализации логистических услуг.

Заключение

Современное логистическое обеспечение включает в себя комплексное транспортно-экспедиционное обслуживание, при котором наряду с транспортными операциями, погрузо-разгрузочными и складскими работами грузоперевозчик оказывает грузовладельцу услуги, связанные с сопровождением процесса перемещения груза.

К этой сфере относятся:

- оформление перевозочных, таможенных, страховых и других необходимых для перевозки груза документов;

- расчетно-финансовые операции за услуги магистрального транспорта, таможенных органов, органов фитосанитарного и экологического контроля, страховых компаний и др.;

- информирование грузовладельцев о ходе процесса доставки груза;

- консалтинговые услуги по определению оптимальных условий перевозки, маршрута и стоимости доставки груза.

С учетом экспоненциального роста объема информации, который необходимо обрабатывать для принятия релевантных решений, представленная СИППР является эффективным средством поддержки менеджмента логистических компаний и характеризует уровень логистического обеспечения выполняемых грузоперевозок.

Для эффективного решения задач управления СИППР должна строиться на основе принципов, реализованных и опробованных на ее модели. Исследования показали [5,13], что такими принципами должны быть:

- применение международных стандартов для всех стадий жизненного цикла системы;

- использование адекватной методологии для построения моделей организационных процессов транспортных систем;

- компонентное построение прикладных и инструментальных средств;

- мультиагентная реализация механизмов взаимодействия инструментальных и прикладных средств.

Основополагающей характеристикой мультиагентной платформы СИППР является мобильность. В конечном итоге мобильные информационные системы обладают способностью функционировать в гетерогенном окружении, эволюционно развиваться и адаптироваться к

окружающей обстановке и изменениям в структуре и составе объекта управления.

Таким образом, реализованная на мультиагентной платформе СИППР должна обладать следующими свойствами:

- структура сообщества агентов является динамической относительно типов и количества членов сообщества;
- сообщество агентов основывается на принципах кооперации;
- структура сообщества агентов подразумевает распределенность, что позволяет эффективно организовать доступ к различным источникам данных;
- агенты используют вполне определенные знания предметной области для решения поставленных задач;
- агенты обеспечивают работу в асинхронном режиме;
- появление новых членов сообщества агентов или изменение функций некоторых агентов не требует перезагрузки всей информационной системы.

Развитие информационных технологий позволяет совершить качественный скачок в области создания СИППР. Очевидно, что использование мультиагентных технологий обеспечит переход на новый уровень качества и эффективности функционирования указанных систем. Применение

Благодарности

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке госбюджетной темы 0073-2019-0004.

Литература

1. Lukinskiy V., Panova Y. Analysis and synthesis of the designed logistics systems, in: Логистика: современные тенденции развития: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. 6, 7 апреля 2017 г. / Отв. ред.: В. С. Лукинский. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2017. Р. 249-252.
2. Скобелев П. О. и др. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени // Механика, управление и информатика. – 2011. - № 5. – с. 110–122.
3. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Информационные технологии. – 2013. – s1. – с. 1–32.
4. Городецкий, В. И., Скобелев, П. О. Многоагентные технологии для индустриальных приложений: реальность и перспектива. Труды СПИИРАН, 2017, 6(55), 11-45. <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>
5. Лукинский В.С., Искандеров Ю.М., Соколов Б.В., Некрасов А.Г. Проблемы и перспективы использования интеллектуальных информационных технологий в логистических системах. В сборнике: Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018). Материалы конференции. 2018. С. 80-89.
6. Соколов Б.В., Некрасов А.Г., Миротин Л.Б. Разработка и реализация методологии и методик совместного многокритериального синтеза и адаптивного управления созданием, применением и развитием функционально-устойчивых интегрированных транспортно-логистических и информационных систем нового поколения // Вестник транспорта, 2011. - №6. - С.25-30.
7. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
8. Некрасов А.Г., Сеницына А.С. Трансформация интегрированных транспортно-логистических систем в цифровую индустрию // Логистика, 2017. №8. – С. 36 - 41.
9. Yury Iskanderov, Mikhail Pautov. Security of Information Processes in Supply Chains. Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'18) September 17-21, 2018., Volume 2, p.13-22. Springer, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 875, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_2
10. Свистунова А.С., Чумак А.С. Интеллектуализация информационного обеспечения процесса перевозки негабаритных грузов. Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. 12, 13 апреля 2018 г. Ч.2: мат. докл. /ред. кол.: В.С. Лукинский (отв. ред.) и др.–СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018, 344 с.
11. Iskanderov Y., Pautov M. Actor-Network Approach to Self-organisation in Global Logistics Networks. In: Kotenko I., Badica C., Desnitsky V., El Baz D., Ivanovic M. (eds) Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 868. Springer, Cham. p.117-127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_14

12. Искандеров Ю.М. Особенности информатизации транспортно-технологических процессов в цепях поставок М., Информатизация и связь, № 4; 2019, С.31-37. DOI: 10.34219/2078-8320-2019-10-4-31-37
13. Искандеров Ю.М. Мультиагентные системы для управления логистическими функциями в цепях поставок. В сборнике: Логистика: современные тенденции развития. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. СПб, ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2019. С.219 -221.
14. Свистунова А.С., Чумак А.С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при перевозке негабаритных грузов. В сборнике: Логистика: современные тенденции развития. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. СПб, ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2019. С. 100-103.
15. Iskanderov, Y. and Pautov, M. Agents and Multi-agent Systems as Actor-networks. In Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART, 2020, pages 179-184. DOI: 10.5220/0008935601790184
16. Искандеров Ю.М. Применение интеллектуальных агентов при моделировании интегрированной информационной системы транспортной логистики. Информатизация и связь, № 5; 2020, С.59-66. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-59-66
17. Искандеров Ю.М., Ласкин М.Б., Чумак А.С., Хасанов Д.С. Особенности моделирования управления информационными ресурсами транспортных систем. В сборнике: Системный анализ в проектировании и управлении. сборник научных трудов XXIV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2020. С. 250-257.
18. Искандеров Ю.М., Свистунова А.С., Чумак А.С. Системный анализ показателей качества комплексных логистических технологий при доставке грузов. В сборнике: Системный анализ в проектировании и управлении (SAEC). Сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2019. С. 251-262.

References

1. Lukinskiy V., Panova Y. Analysis and synthesis of the designed logistics systems, in: Logistics: modern development trends: materials of the XVI Intern. scientific-practical conf. 6, 7 April 2017 / Ed. ed.: V.S.Lukinsky. SPb.: GUMRF named after Admiral S.O. Makarova, 2017. P. 249-252.
2. Skobelev P.O. et al. Multi-agent technologies for managing the distribution of production resources in real time // Mechanics, Management and Informatics. - 2011. - No 5. - p. 110-122.
3. Skobelev P.O. Intelligent resource management systems in real time: development principles, experience of industrial implementations and development prospects // Information technologies. -2013. - s1. - c. 1-32.
4. Gorodetsky, V.I., Skobelev, P.O. Multiagent technologies for industrial applications: reality and perspective. Proceedings of SPIIRAS, 2017, 6 (55), 11-45. <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>
5. Lukinsky V.S., Iskanderov Yu.M., Sokolov B.V., Nekrasov A.G. Problems and prospects of using intelligent information technologies in logistics systems. In the collection: Information technology in management (ITU-2018). Conference materials. 2018.S. 80-89.
6. Sokolov B.V., Nekrasov A.G., Mirotin L.B. Development and implementation of methodology and techniques for joint multicriteria synthesis and adaptive management of creation, application and development of functionally stable integrated transport, logistics and information systems of a new generation // Transport Bulletin, 2011. - №6. - S.25-30.
7. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects. Moscow: Nauka, 2006.410 p.
8. Nekrasov A.G., Sinitsyna A.S. Transformation of integrated transport and logistics systems into a digital industry // Logistics, 2017. No. 8. - S. 36 - 41.
9. Yury Iskanderov, Mikhail Pautov. Security of Information Processes in Supply Chains. Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'18) September 17-21, 2018., Volume 2, p.13-22. Springer, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 875, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_2
10. Svistunova A.S., Chumak A.S. Intellectualization of information support for the transportation of oversized cargo. Logistics: current development trends: materials of the XVII International Scientific and Practical University. conf. April 12, 13, 2018 Part 2: mat. report / ed. Col.: V.S. Lukinsky (otv. Red.) And others – SPb.: Izd-vo GUMRF them. adm. S.O. Makarova, 2018, 344 p.
11. Iskanderov Y., Pautov M. Actor-Network Approach to Self-organisation in Global Logistics Networks. In: Kotenko I., Badica C., Desnitsky V., El Baz D., Ivanovic M. (eds) Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 868. Springer, Cham. p.117-127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32258-8_14
12. Iskanderov Y.M. Features of informatization of transport and technological processes in supply chains. М., Informatization and communication, № 4; 2019, p.31-37. DOI: 10.34219/2078-8320-2019-10-4-31-37
13. Iskanderov Y.M. Multi-agent systems for logistics functions management in the supply chains. // "Logistics: current development trends". Materials of the XVII International Scientific and Practical conf. SPb, 2019. 344 p.
14. Svistunova A.S., Chumak A.S. The intellectual decision support system for oversized cargo transportation. // "Logistics: current development trends". Materials of the XVII International Scientific and Practical conf. SPb, 2019. 344 p.
15. Iskanderov, Y. and Pautov, M. Agents and Multi-agent Systems as Actor-networks. In Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART, 2020, pages 179-184. DOI: 10.5220/0008935601790184

16. Iskanderov Yu.M. The use of intelligent agents in the modeling of an integrated information system of transport logistics. Informatization and communication, No. 5; 2020, pp. 59-66. DOI: 10.34219 / 2078-8320-2020-11-5-59-66.
17. Iskanderov Yu.M., Laskin M.B., Chumak A.S., Khasanov D.S. Features of modeling the management of information resources of transport systems. In the collection: Systems Analysis in Engineering and Control. Collection of scientific papers of the XXIV International Scientific and Educational-Practical Conference. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, 2020.p. 250-257.
18. Iskanderov Y.M., Svistunova A.S., Chumak A.S. System analysis of quality indicators integrated logistics technologies for cargo transport. // System analysis in the design and management: Collection of scientific papers XXIII International scientific and practical conf. Part 3. - SPb.: Publishing house Polytech-Press, 2019. - 568 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Марсович Искандеров, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуальных систем, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Александра Сергеевна Свистунова, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru

Хасанов Дмитрий Салимович, программист, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru

Александр Сергеевич Чумак, научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный Исследовательский Центр Российской Академии Наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39, e-mail: chumak@nst-spb.ru

Yury M. Iskanderov, Dr.Sci. (Eng), Professor, Head of the Laboratory of Intelligent Systems, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Alexandra S. Svistunova, Junior researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: svistunova_alexandra@bk.ru

Dmitry S. Khasanov, programmer, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V. O., 39, e-mail: dkhasanovsuai@yandex.ru

Alexandr S. Chumak, Researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 199178, Russia, Saint Petersburg, 14 Liniya V.O., 39, e-mail: chumak@nst-spb.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 629.5.061

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.022>

Маневровые качества судов с колесным движительно-рулевым комплексом

Л.С. Грошева¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru В.И. Мерзляков¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

В.И. Плющаев¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация. На судах используются различные типы рулевых устройств – традиционные рули, активные рули, выдвижные колонки, азимутальные подруливающие устройства и пр. В России начали строить колесные суда без традиционного руля. Маневрирование осуществляется путем изменения соотношения частот вращения гребных колес, расположенных по бортам в корме судна - суда с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК). В статье на основе математической модели судна с КДРК проводится сравнительный анализ маневровых характеристик судов с различными видами рулевого устройства – с традиционным рулем, азимутальным подруливающим устройством и КДРК. Было выполнено математическое моделирование стандартных маневров, используемых при испытаниях судов, а именно маневр зигзаг, маневр циркуляция, активное и пассивное торможение. Полученные результаты позволяют утверждать, что суда с КДРК (без традиционного руля) обладают маневровыми характеристиками, обеспечивающими их эффективную и безопасную эксплуатацию.

Ключевые слова: маневровые характеристики судна, рулевое устройство, колесный движительно-рулевой комплекс, руль, подруливающее устройство, циркуляция

Maneuvering qualities of vessels with a wheeled propulsion and steering

Lyudmila S. Grosheva¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru Vladimir I. Merzlyakov¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Valeriy I. Plyushchayev¹, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

¹Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract. Various types of rudders are used on ships - traditional rudders, active rudders, retractable thrusters, azimuth thrusters, etc. In Russia, they began to build wheeled ships without a traditional rudder. Maneuvering is carried out by changing the ratio of the rotation frequencies of the paddle wheels located along the sides in the stern of the vessel - a vessel with a wheeled propulsion and steering system (WPSS). In the article, on the basis of a mathematical model of a vessel with a WPSS, a comparative analysis of the maneuvering characteristics of vessels with different types of steering gear (a traditional rudder, an azimuth thruster and a WPSS) is carried out. Mathematical modeling of standard maneuvers used in the test of the vessels was performed: the zigzag maneuver, the circulation maneuver, active and passive braking. The results allow us to state that vessels with a WPSS (without a traditional rudder) have maneuvering characteristics that ensure their efficient and safe operation.

Keywords: maneuvering characteristics of the vessel, steering gear, wheel propulsion and steering complex, rudder, thruster, circulation

Введение

Для управления судами используются различные виды рулевых устройств. Они обеспечивают изменение направления движения судна и удержание его на курсе при различных внешних воздействиях. Существует много видов рулевых устройств, отличающихся принципом действия, конструкцией, массо-габаритными показателями и пр. В качестве рулевых устройств могут применяться как различные варианты традиционного руля (обыкновенный, балансирующий, полубалансирующий руль и др.), так и специализированные устройства (азимутальные подруливающие устройства (АПУ), активные рули, выдвижные рулевые колонки и др.) [1-3].

Существуют суда с колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК) у которых отсутствует традиционный руль [4,5]. В движение судно приводится двумя гребными колесами с электроприводом в кормовой части. Изменение величины вектора тяги определяется изменением частоты вращения гребных колес, а изменение направления вектора тяги – изменением соотношения частот вращения гребных колес. Гребные колеса имеют винтовые плицы,

установленные под некоторым углом к оси колеса, что обеспечивает формирование вектора упора гребного колеса под углом α к ДП судна (до 15°). Векторы упора гребных колес направлены под углом к ДП судна, что обеспечивает появление поперечной составляющей вектора тяги, создающей вращающий момент. Меняя соотношение частот вращения гребных колес (а следовательно, меняя величину поперечной составляющей векторов тяги гребных колес) судоводитель обеспечивает управление судном. Рис. 1 иллюстрирует зависимость относительного вращающего момента $M_{k\alpha}/M_0$, создаваемого гребными колесами от угла α и длины судна L (где $M_{k\alpha}$ - момент, создаваемый гребными колесами с винтовыми плицами, установленными под углом к оси колеса (с векторами упора под углом α к ДП судна), а M_0 - момент, создаваемый гребными колесами с прямыми плицами, обеспечивающими вектор упора, направленный под углом $\alpha = 0$ к ДП судна и $L \rightarrow 0$). Управлять судном, имеющим гребные колеса с прямыми плицами (с вектором упора, направленным параллельно ДП судна) без традиционного руля практически невозможно. С увеличением длины судна, вращающий момент, создаваемый гребными колесами, резко падает (на рис. 1 кривая «0 градусов»).

При использовании гребных колес с винтовыми плицами, установленными под углом к оси колеса (с векторами упора под углом α к ДП судна), вращающий момент, создаваемый гребными колесами, растет при увеличении как длины судна, так и угла α .

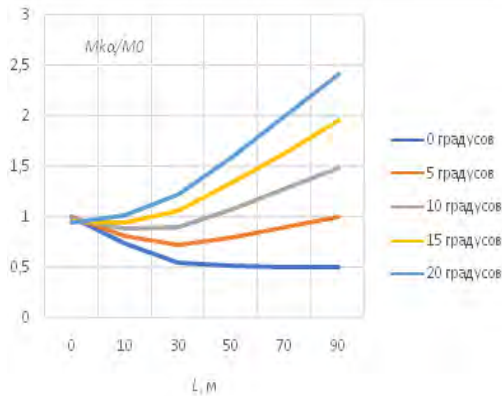


Рис. 1. Зависимость вращающего момента гребных колес от угла α и размеров судна L .

Однако следует отметить, что с увеличением угла α начинает падать продольная составляющая вектора упора гребных колес, что в свою очередь приводит к снижению максимально достижимой скорости движения судна (при $\alpha = 20^\circ$ продольная составляющая вектора упора снижается на 6%). Для судна «Золотое кольцо» конструкция колеса обеспечивает получение угла $\alpha \approx 15^\circ$. Это обеспечивает хорошую управляемость судна. Новое судно с КДРК «Золотое кольцо» оснащено и дополнительным АПУ [6].

1. Постановка задачи

Представляет интерес вопрос об эффективности использования различных типов рулевых устройств для конкретного типа судна. Разработанная математическая модель судна с КДРК «Золотое кольцо» позволяет провести такие исследования [7].

Рассматриваются три варианта оснащения судна различными рулевыми устройствами:

- судно с двумя гребными колесами с винтовыми плицами (установленными под углом к оси колеса, что обеспечивает появление вектора упора под углом α к ДП судна) без дополнительного рулевого устройства;

- судно с двумя гребными колесами с прямыми плицами, установленными параллельно оси колеса, что обеспечивает появление вектора упора, направленного параллельно ДП судна, использующее в качестве рулевого устройства традиционный руль;

- судно с двумя гребными колесами с прямыми плицами, установленными параллельно оси колеса, использующее в качестве рулевого устройства АПУ.

Моделировались стандартные маневры, используемые при испытаниях судов в соответствии с Резолюцией ИМО [8,9].

2. Моделирование маневра зигзаг

Первый маневр – маневр Кемпфа (или испытание на ЗИГЗАГ $10^\circ/10^\circ$). Этот вид испытаний проводится при поочередной переключке руля на 10° на каждый

борт при отклонении направления движения судна на 10° относительно первоначального курса. Для получения корректных результатов моделирования для судна, управляемого изменениями соотношения частот вращения гребных колес, было подобрано соотношение частот вращения гребных колес, обеспечивающее получение значений поперечной составляющей упора колес, соответствующих поперечным силам, которые получаются при отклонении руля на 10° . Такие же условия были обеспечены при использовании в качестве рулевого устройства АПУ (поперечная составляющая упора АПУ соответствует действию руля при отклонении на 10°).

Моделирование маневра ЗИГЗАГ проводилось при частоте вращения гребных колес $n = 0,24$ 1/с, при этом установившаяся скорость судна для всех трех вариантов рулевых устройств лежит в диапазоне 10,37 – 10,8 км/час (максимальная проектная скорость судна 18,5 км/ч). Результаты моделирования приведены на рис. 2. На первом графике показано отклонение направления движения судна и положение руля при переключке на $\pm 10^\circ$. На втором графике показано изменение направления движения судна при изменении соотношения частот вращения гребных колес и их частоты вращения (левого колеса $n_{лев}$ и правого колеса $n_{пр}$). На начальном этапе оба колеса имеют одинаковую частоту вращения $n_{лев} = n_{пр} = 0,24$ 1/с. При $t = 300$ с частота вращения правого колеса увеличивается до 0,268 1/с, левого остается постоянной. При смене курса частота вращения правого колеса уменьшается до начальной величины в 0,24 1/с, а частота левого колеса увеличивается до 0,268 1/с. На третьем графике представлены результаты моделирования маневрирования судна при использовании в качестве рулевого устройства АПУ. На рисунке показаны изменения направления движения судна и направление и величина упора, развиваемого АПУ (упор соответствует поперечной составляющей силы на руле при отклонении на 10°). Результаты моделирования для трех скоростей сведены таблицу (Таблица 1) (для судна «Золотое кольцо» $L = 82$ м, соотношение L/V меняется от 18 с до 98 с в зависимости от скорости движения).

Таблица 1

Результаты моделирования

№	Руле- вое устрой- ство	Начальная поворот- ливость, м (норма $2,5 \cdot L$ = 205 м, при отклонении от курса на 10°)	Рыскливость					
			Первый угол зарыскивания, град			Второй угол зарыскивания, град		
			Норма 20°	Норма ($5+0,5$ (L/V)) $^\circ =$ $18,9^\circ$	Норма 40°	Норма ($17,5+0,75$ (L/V)) $^\circ =$ $38,4^\circ$		
1	руль	60	11	15	20	22	31	37
2	КДРК	108	8	9	9	18	20	20
3	АПУ	66	10	12	16	21	25	30
Скорость, м/с			0,83	2,74	4,53	0,83	2,74	4,53

В графической форме результаты моделирования представлены на рис. 3

Как следует из таблицы, при маневрировании типа ЗИГЗАГ наилучшими характеристиками обладает колесный движительно-рулевой комплекс.

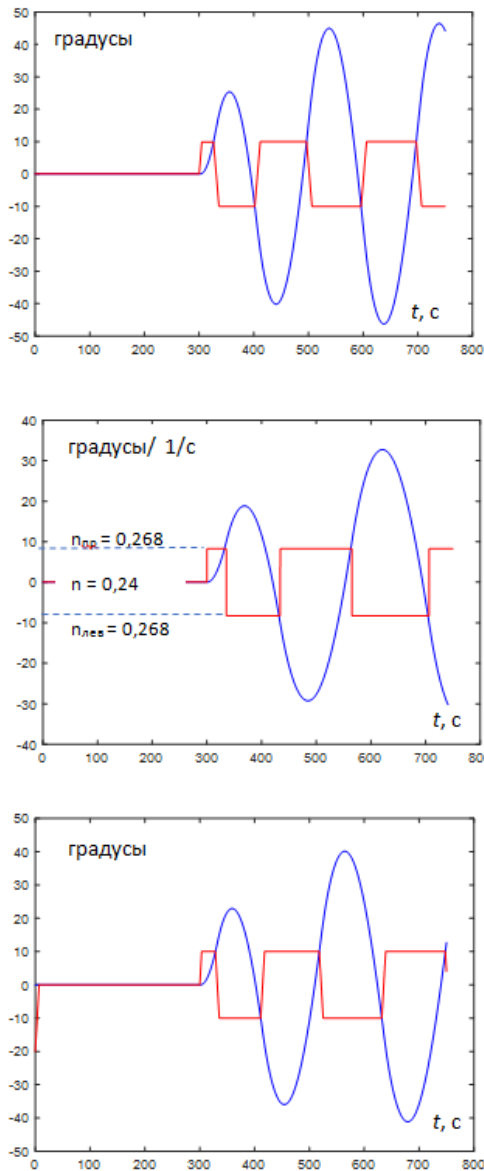


Рис. 2. Результаты моделирования маневра ЗИГЗАГ

3. Моделирование маневра циркуляция

На первом этапе моделирование маневра ЦИРКУЛЯЦИЯ проводилось при частоте вращения гребных колес $n = 0,24$ 1/с, при этом установившаяся скорость судов при использовании всех трех вариантов рулевых устройств около 10,6 км/ч. Этот вид испытаний проводится при отклонении руля на 10^0 . При управлении изменениями соотношения частот вращения гребных колес, а также при использовании АПУ были подобраны соотношение частот вращения гребных колес и величины упора АПУ, обеспечивающее получение таких же значений поперечной составляющей упора колес и АПУ, какие получаются при отклонении руля на 10^0 . Результаты расчетов приведены в таблице 2 и на рис. 4.

При одинаковой поперечной составляющей упора колес, упора АПУ или руля КДРК проигрывает рулю.

Однако принципиальным отличием руля от других рассматриваемых типов рулевых устройств является наличие жесткой зависимости величины

поперечной составляющей силы от скорости – на малых скоростях эффективность руля резко падает.

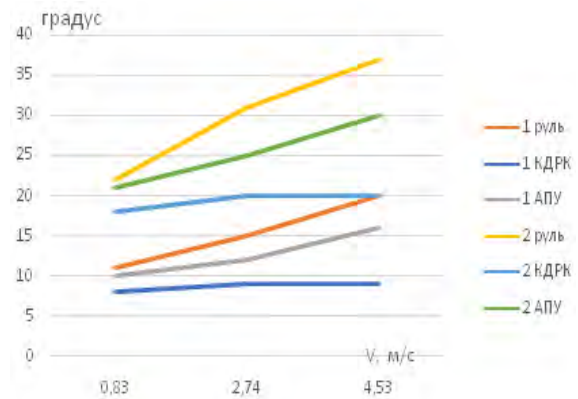


Рис. 3. Углы зарыскивания (индекс 1 – первый угол зарыскивания, индекс 2 – второй угол зарыскивания) для судов с разными рулевыми устройствами

Таблица 2

Результаты расчетов

№	Рулевое устройство	Выдвиг, м	Прямое смещение, м	Тактический диаметр, м	Установившийся диаметр, м
1	руль	177	108	190	161
2	КДРК	276	184	330	303
3	АПУ	200	131	230	197

При использовании КДРК или АПУ величину поперечной составляющей силы можно менять в широких пределах при любой скорости движения судна.

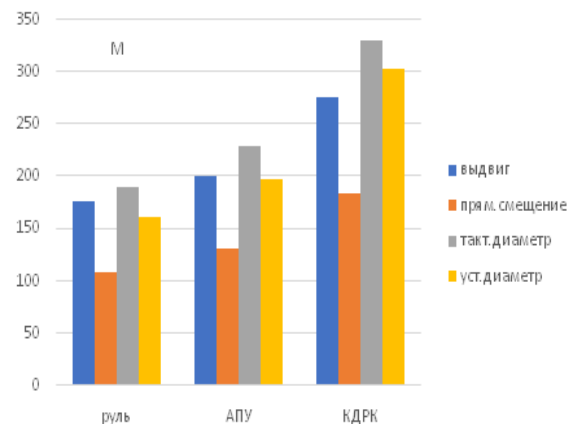


Рис. 4. Параметры маневра ЦИРКУЛЯЦИЯ

На рис. 5 показана зависимость установившегося диаметра циркуляции от скорости движения судна ($V_{мин}$, $V_{ср}$ и $V_{мак}$) при одинаковой величине поперечной составляющей силы на рулевом устройстве (соответствующей поперечной силе на руле при отклонении на 10^0 при $V_{мак}$) для различных рулевых устройств.

Очевидно, АПУ предоставляет судоводителю более широкие возможности для маневрирования по сравнению с традиционным рулем. Однако следует отметить, что АПУ является самым энергозатратным рулевым устройством.

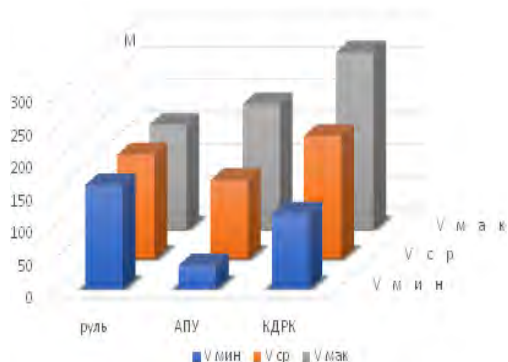


Рис. 5. Зависимость установившегося диаметра циркуляции при различных скоростях движения судна от вида рулевого устройства

Установленное на «Золотом кольце» АПУ потребляет до 100 кВт для создания упора в 8000 Н. При работе АПУ на максимальной мощности зависимость установившегося диаметра циркуляции от скорости движения судна приведена на рис. 6 (следует отметить, что упор АПУ падает с ростом скорости судна).

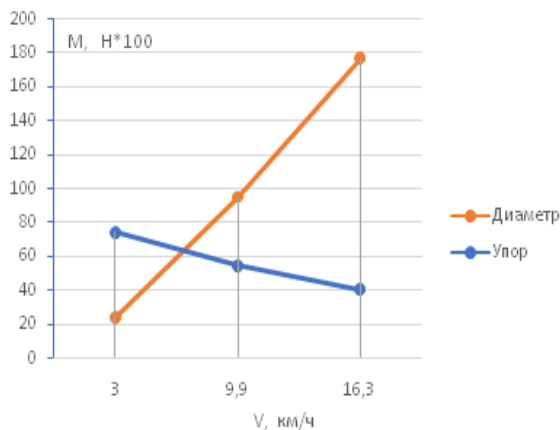


Рис. 6. Зависимость установившегося диаметры циркуляции и упора АПУ от скорости движения судна

На «Золотом кольце» АПУ предназначен для выполнения швартовых операций.

При использовании в качестве рулевого устройства КДРК выход на циркуляцию возможен различными способами (рассмотрим поворот влево):

-колеса вращаются с одной частотой, затем частота левого колеса остается постоянной, а частота вращения правого колеса увеличивается (рис. 7 для $n_{лев} = 0,24 \text{ 1/с}$, $n_{пр} = 0,36 \text{ 1/с}$);

-колеса вращаются с одной частотой, затем частота левого колеса уменьшается, а частота вращения правого колеса остается постоянной (рис. 8 для $n_{лев} = 0,12 \text{ 1/с}$, $n_{пр} = 0,24 \text{ 1/с}$);

-колеса вращаются с одной частотой, затем частота левого колеса уменьшается, а частота вращения правого колеса увеличивается (рис.9 для $n_{лев} = 0,18 \text{ 1/с}$, $n_{пр} = 0,3 \text{ 1/с}$).

В первом случае скорость судна при выполнении циркуляции возрастает, во втором случае уменьшается, в третьем – слегка возрастает. Зависимость диаметра установившейся циркуляции и скорости судна от соотношения частот вращения гребных колес представлена на рис. 10.

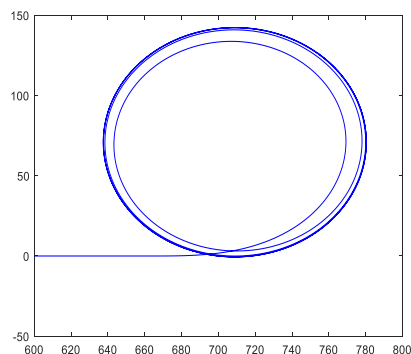


Рис. 7. Выход на циркуляцию при увеличении частоты вращения правого колеса

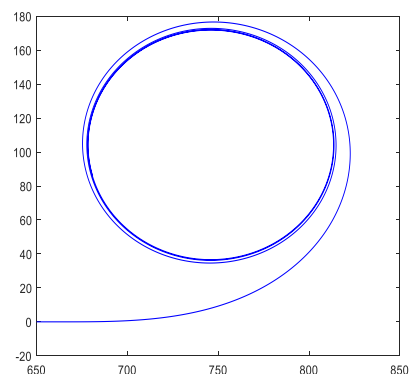


Рис. 8. Выход на циркуляцию при уменьшении частоты вращения левого колеса

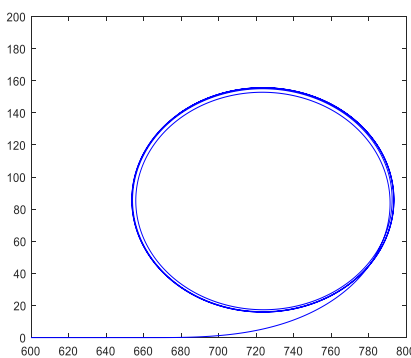


Рис. 9. Выход на циркуляцию при одновременном разнонаправленном изменении частот вращения гребных колес

4. Моделирование инерционных характеристик

Очень важными для судовождения являются инерционные свойства судна, включающие такие маневры как пассивное и активное торможение.

При пассивном торможении судна с КДРК гребные колеса переводятся в режим свободного вращения, судно снижает скорость за счет сопротивления воды. В активном режиме торможения гребные колеса вращаются в обратном направлении, что позволяет сократить тормозной путь.

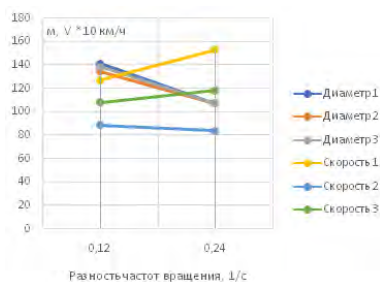


Рис. 10. Зависимость диаметра установившейся циркуляции и скорости судна от соотношения частот вращения гребных колес

Мгновенно провести реверс гребных колес невозможно. Для минимизации эксплуатационных расходов топлива на строящихся судах с КДРК мощность генераторов и приводов гребных колес одного порядка (на электродвижение используется до 75% мощности судовой электростанции). При попытке запуска свободно вращающихся под действием набегающего потока колес в обратном направлении, возникает перегрузка дизель-генераторов, появляется провал напряжения, резко возрастает потребляемый ток, что приводит к аварийному отключению преобразователей частоты приводов гребных колес. При моделировании учитывались данные обстоятельства путем введения 25 секундной паузы между снятием управления с частотных приводов до момента включения режима обратного хода. За это время скорость судна резко падает (следовательно, и интенсивность воздействия потока на гребные колеса), что позволяет без перегрузок включить режим обратного вращения гребных колес. Результаты моделирования приведены на рис. 11.

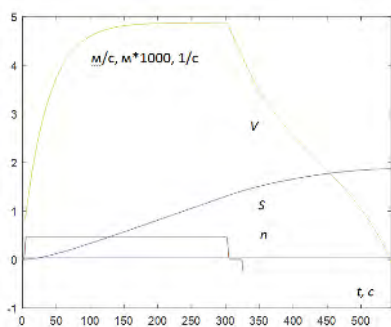


Рис. 11. Изменение параметров движения судна при торможении

На рис. 11 показаны изменения скорости судна V , пройденного пути S и частоты вращения гребных колес n (частота вращения колес назад составляет $0,5n_{max}$).

Результаты моделирования торможения для различных значений частоты вращения гребных колес (при работе назад) приведены на рис. 12. Тормозной путь при максимально возможной частоте вращения назад составляет всего $3L$, при половинной частоте вращения гребных колес назад – $7L$, что соответствует принятым стандартам.

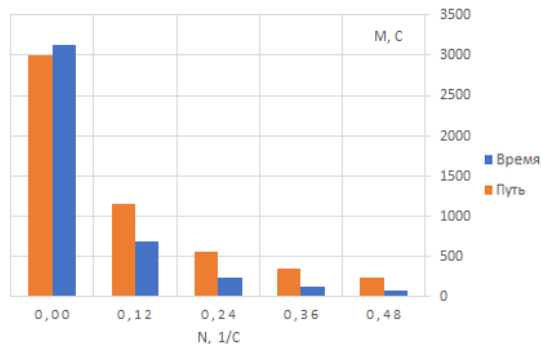


Рис. 12. Изменение параметров движения судна при торможении

Заключение

В статье приведены сравнительные характеристики судов с различными типами рулевых устройств, полученные с использованием модели судна с КДРК. После ввода в эксплуатацию судна «Золотое кольцо» и проведения натурных испытаний математическая модель может быть уточнена. На данном этапе результаты моделирования позволяют сделать вывод о высокой эффективности колесного движительно-рулевого комплекса. КДРК обеспечивает высокие маневровые характеристики судна, а его конструктивные особенности позволяют строить суда с очень небольшой осадкой, что является преимуществом при плавании по внутренним водным путям.

Литература

1. Гофман А.Д., Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: Справочник / А. Д. Гофман. - Л. : Судостроение, 1988. - 360 с
2. Павленко, В.Г. Маневренные качества речных судов: Управляемость судов и составов: учеб. пособие для судовод. спец. ин-тов вод. тр-та / В.Г. Павленко; доп. Управлением кадров и учеб. заведений Минречфлота РСФСР для ин-тов водн. тр-та. –М.: Транспорт, 1979. –183 с
3. Усов, Владимир Дмитриевич. Рулевое устройство [Текст] / В. Д. Усов, Ю. Е. Захаров. - Изд. 2-е, доп. и перераб. - Астрахань : ГП АО ИПК "Волга", 2013. - 110 с.
4. Пат. № 2225327 Российская Федерация, МПК В63Н1/04, В63Н05/03. Колесный движительно-рулевой комплекс/ Фальмонов Е.В.; заявитель и патентообладатель Фальмонов Евгений Васильевич. № 2001132474/11; заявл. 30.11.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7., 11 с.
5. Галкин Д.А., Малый Ю.А. От «Суры» к «Золотому кольцу». //Речной транспорт (XXI век). 2015. –№2(73). –с. 32–33

6. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И. Расчет сил ветрового воздействия на корпус судна с колесно-двигательным рулевым комплексом. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. Выпуск 55. С. 11-20.
7. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В. И. Математическая модель судна с колесным двигательнорудевым комплексом «Золотое кольцо» // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2018. – № 3. – С. 36–49. вычислительная техника и информатика, 2012. №2. С. 34-39.
8. Резолюция ИМО MSC.137(76) «Стандарты маневренных качеств судна» от 05.12.2002 г.
9. Циркуляр MSC/Circ.389 от 10.01.1985 — «Промежуточное руководство по оценке маневренных качеств судов при их проектировании.

References

1. Gofman A.D., Dvizhittel'no-rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna [Propulsion and steering complex and ship maneuvering]: Spravochnik, A. D. Gofman. - L.: Sudostroenie, 1988. - 360 s
2. Pavlenko, V.G. Manevrennyye kachestva rechnykh sudov: Upravlyaemost' sudov i sostavov [Maneuverability of river vessels: Controllability of vessels and convoys]: ucheb. posobie dlya sudovod. spets. in-tov vod.tr-ta, V.G. Pavlenko; dop. Upravleniem kadrov i ucheb.zavedeniy Minrechflota RSFSR dlya in-tov vodn.tr-ta. – M.:Transport,1979. –183 s
3. Usov, Vladimir Dmitrievich. Rulevoe ustroystvo [Steering gear], V. D. Usov, Yu. E. Zakharov. - Izd. 2-e, dop. i pererab. - Astrakhan' : GP AO IPK "Volga", 2013. - 110 s.
4. Pat. № 2225327 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V63N1/04, V63N05/03. Kolesnyy dvizhittel'no-rulevoy kompleks [Wheeled propulsion and steering system] / Fal'monov E.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Fal'monov Evgeniy Vasil'evich. № 2001132474/11; zayavl. 30.11.2001; opubl. 10.03.2004, Byul. № 7., 11 s.
5. Galkin D.A., Malyu Yu.A. Ot «Sury» k «Zolotomu kol'tsu» [From "Surah" to "Golden Ring"]. Rechnoy transport (XXI vek). 2015. –№ 2(73). –S. 32–33
6. Bychkov V.Ya. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Raschet sil vetrovogo vozdeystviya na korpus sudna s kolesno-dvizhittel'nym rulevym kompleksom. [Calculation of the forces of wind impact on the hull of a ship with a wheel-propulsion steering system], Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VГУVТ», 2018. Vypusk 55. S. 11-20.
7. Bychkov V.Ya., Grosheva L.S., Plyushchaev V. I. Matematicheskaya model' sudna s kolesnym dvizhittel'no-rulevym kompleksom «Zolotoe kol'tso» [Mathematical model of a ship with a wheeled propulsion and steering system «Golden Ring»], Vestn. Astrakhan. gos. tekhn. un-ta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2018. – № 3. – S. 36–49. vychislitel'naya tekhnika i informatika, 2012. №2. S. 34-39.
8. Rezolyutsiya IMO MSC.137(76) «Standarty manevrennykh kachestv sudna» [Standards for ships manoeuvrability] ot 05.12.2002 g.
9. Tsirkulyar MSC/Circ.389 ot 10.01.1985 — «Promezhutochnoe rukovodstvo po otsenke manevrennykh kachestv sudov pri ikh proektirovaniy» [Interim guide to assessing the maneuverability of ships in their design]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Людмила Серафимовна Грошева, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта, 603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_radio@vsuwt.r

Владимир Иванович Мерзляков, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта, 603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Валерий Иванович Плющаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники, Волжский государственный университет водного транспорта, 603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Lyudmila S. Grosheva, Ph.D. (Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of radio electronics, Volga state University of water transport, Nesterov str., 5, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Vladimir I. Merzlyakov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of radio electronics, Volga state University of water transport, Nesterov str., 5, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Valeriy I. Plyushchaev, Dr.Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of radio electronics, Volga state University of water transport, Nesterov str., 5, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation, e-mail: kaf_radio@vsuwt.ru

Поступила в редакцию: 18.01.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 334.78

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.023>

Влияние трансфера технологий на реализацию инновационных проектов в инновационно-промышленном кластере (на примере АО «Объединенная судостроительная корпорация»)

В.Г. Чаплыгин¹ e-mail: chaplygin.vladimir@gmail.com, Е.В. Каранина² e-mail: kafinanc@yandex.ru,
В.Н. Мороз³ e-mail: morozvadim@rambler.ru

¹Вятский государственный университет, ²Вятский государственный университет, ³Вятский государственный университет

Аннотация. Механизм трансфера технологий в инновационно-промышленном кластере, базирующийся на сочетании системно-интеграционной теории с холонической парадигмой и включающий три блока функций (координацию и регулирование трансфера технологий, шеринг знаний и иной информации, а также трансформацию знаний и иной информации), способствует росту конкурентоспособности осуществляемой инновационной деятельности, что подтверждается выполненными расчетами с применением аппарата математической статистики. Доказана целесообразность и продуктивность применения предложенной методики выбора организаций-участников инновационно-промышленного кластера, основанной на оценке критериев, характеризующих поступающую от претендентов на вхождение в его состав информацию, и их значимости, включая как количественные, так и качественные ее характеристики. Путем проведения регрессионно-корреляционного анализа между предложенной методикой выбора организаций-участников инновационно-промышленного кластера (на примере АО «Объединенная судостроительная корпорация») на основе оценки качества поступающей от них информации, являющейся главным инструментом реализации механизма трансфера технологий, и конкурентоспособностью судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация», подтверждена гипотеза, что конкурентоспособность инновационно-промышленного кластера коррелирует с применением предложенного механизма трансфера технологий.

Ключевые слова: Трансфер технологий, инновационно-промышленный кластер, методика выбора участников, центр координации взаимодействия и трансфера технологий, метод TOPSIS, организационная амбидекстрия, Объединенная судостроительная корпорация.

The impact of technology transfer on the implementation of innovative projects in the innovative industrial cluster (on the example of United Shipbuilding Corporation JSC)

Vladimir G. Chaplygin¹ e-mail: chaplygin.vladimir@gmail.com, Elena V. Karanina² e-mail: kafinanc@yandex.ru,
Vadim N. Moroz³ e-mail: morozvadim@rambler.ru

¹Vyatka State University, Russian Federation, ²Vyatka State University, Russian Federation, ³Vyatka State University, Vyatka, Russian Federation

Abstract. The technology transfer mechanism in the innovation-industrial cluster, based on a combination of the system-integration theory with the holonic paradigm and including three blocks of functions (coordination and regulation of technology transfer, sharing knowledge and other information, as well as the transformation of knowledge and other information), contributes to the growth of the competitiveness of the implemented innovative activity, which is confirmed by the calculations performed using the apparatus of mathematical statistics. The expediency and productivity of the application of the proposed methodology for the selection of organizations participating in the innovation-industrial cluster, based on the assessment of criteria characterizing the information coming from applicants for inclusion in its composition, and their significance, including both quantitative and qualitative characteristics, have been proved. By conducting a regression-correlation analysis between the proposed methodology for selecting organizations participating in an innovative industrial cluster (using the example of United Shipbuilding Corporation JSC) on the basis of assessing the quality of the information received from them, which is the main tool for implementing the technology transfer mechanism, and the competitiveness of the United Shipbuilding Corporation, the hypothesis was confirmed that the competitiveness of the innovation-industrial cluster correlates with the application of the proposed technology transfer mechanism.

Key words: Technology transfer, innovation and industrial cluster, participant selection method, center for coordination of interaction and technology transfer, TOPSIS method, organizational ambidexterity, United Shipbuilding Corporation.

Введение

Объединенная судостроительная корпорация объединяет различные предприятия, относящиеся к судостроению – судостроительные и судоремонтные заводы и судоверфи, а также научно-исследовательские организации, прежде всего, ВУЗы имеющие в своем составе факультеты, связанные с судостроением, из 8 регионов России. В каждом регионе России Объединенная

судостроительная корпорация имеет ведущее предприятие, в Калининградской области таким предприятием является АО ПСЗ «Янтарь». В 2016 году в рамках Объединенной судостроительной корпорации был сформирован центр координации взаимодействия и трансфера технологий, проводящий механизм трансфера технологий и выполняющий в рамках реализации данного механизма три блока функций – координация и регулирование деятельности кластера, шеринг

знаний и иной информации и трансформация знаний и иной информации. В период с 2016 по 2018 год проходила реализация двух инновационных проектов, один из которых направлен на улучшение качественных характеристик выпускаемой продукции, другой – на создание принципиально нового программного продукта, обозначаемых, соответственно, как P_1 и P_2 (сокр. от англ. Project – проект). Эти проекты стартовали одновременно и оба имели срок реализации, равный 3 годам, поскольку было принято решение об одновременной реализации двух инновационных проектов, различающихся по степени радикальности инноваций, как направления организационной амбидекстрии. Данное направление мы выделяем отдельно, поскольку, с одной стороны, оно является наиболее важным, с другой – такое направление требует принятия дополнительных решений, в то время как другие направления реализуются в рамках обмена знаниями, являющимися объектом трансфера технологий, и иной информацией между организациями-участниками, а также их буферизации, т.е. исключительно в рамках выполнения иных функций центра координации взаимодействия и трансфера технологий. С целью успешной реализации этих проектов, на начальной стадии в структуре кластера был сформирован центр координации взаимодействия и трансфера технологий. В рамках настоящего исследования была проведена оценка влияния предложенного механизма, реализуемого в процессе выполнения центром координации взаимодействия и трансфера технологий своих функций, на конкурентоспособность реализуемых инновационных проектов и деятельности исследуемого инновационно-промышленного кластера в целом.

Методика исследования

Конкурентоспособность реализуемых проектов определялась на основе методики, разработанной Мутановым Г.М., Есенгалиевой Ж.С [8]. В соответствии с этой методикой, инновационные проекты рассматриваются как объекты двух взаимодействующих сегментов – науки и бизнеса – и формализуются как двумерные объекты: инновационность I и конкурентоспособность K . Инновационность I и конкурентоспособность K предлагается определять посредством расчета средних значений оценок экспертов по каждому критерию инновационности и конкурентоспособности, в соответствии со следующими формулами [8] (1, 2, 3):

$$I_j = \sum_{i=1}^n x_i f_{ij}, \sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (1)$$

$$K_j = \sum_{k=1}^m y_k g_{kj}, \sum_{k=1}^m y_k = 1 \quad (2)$$

$$I_{\min} \leq I_j \leq I_{\max}, K_{\min} \leq K_j \leq K_{\max} \quad (3)$$

где f_{ij} – значение i -го критерия j -го проекта для показателя инновационности; x_i – значение весового коэффициента i -го критерия для показателя инновационности; n – число критериев для показателя инновационности; g_{kj} – значение k -го критерия j -го проекта для показателя конкурентоспособности; y_k – значение весового коэффициента k -го фактора для показателя конкурентоспособности; m – число критериев для показателя конкурентоспособности; I_{\min} , I_{\max} , K_{\min} ,

K_{\max} – минимальные и максимальные значения показателей инновационности и конкурентоспособности.

Для формализации упорядочения критериев инновационности и конкурентоспособности Мутанов Г.М., Есенгалиева Ж.С. предлагают применять математико-статистический аппарат экспертных оценок. С целью определения и упорядочения весовых коэффициентов по критериям они используют метод ранжирования. На второй стадии определяются весовые коэффициенты каждого критерия. На третьей стадии осуществляется позиционирование проектов в графической модели (матрице) инновационности и конкурентоспособности инновационных проектов. Область значений показателей делится на 9 секторов. Границы матрицы являются максимально и минимально возможными значениями – 1 и 9, соответственно [8].

Для оценки конкурентоспособности реализуемых инновационных проектов в конце каждого года проводилась экспертиза специально сформированной группой экспертов, которая привлекалась к оценке конкурентоспособности на протяжении всего периода их реализации. Данная группа состояла из 12 экспертов, обладающих высокой профессиональной компетентностью, в состав которой входили два доктора и четыре кандидата наук, работающие на судостроительных заводах и привлекаемые из технических университетов городов расположения предприятий Объединенной судостроительной корпорации (ОСК), каждый из которых имел на момент проведения экспертизы свыше 10 научных публикаций, относящихся к оцениваемой проблеме, и, кроме того, шесть специалистов судостроительных, судоремонтных заводов и судоверфей, имеющих стаж работы свыше 10 лет. Среди этих экспертов 7 имели опыт работы по профилю проведения экспертизы свыше пяти лет, остальные 5 – от трех до пяти лет.

В целях уменьшения субъективности экспертных оценок была проведена проверка согласованности мнений экспертов. Для определения согласованности экспертных оценок, выраженных в баллах либо в физических величинах, используется коэффициент вариации, рассчитываемый по формуле (4):

$$v_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \quad (4)$$

где v_i – коэффициент вариации экспертных оценок по i -объекту оценки, σ_i – среднеквадратическое (стандартное) отклонение экспертных оценок по i -объекту оценки, \bar{x}_i – среднее значение экспертных оценок по i -объекту оценки.

Поскольку в судостроительном кластере «Объединенная судостроительная корпорация» только один из критериев конкурентоспособности деятельности кластера, определяемой по экономическим показателям – доля рынка – в период 2016-2018 гг., в который осуществлялась реализация двух инновационных проектов, сопровождаемая реализацией предложенного механизма трансфера технологий в процессе функционирования центра координации взаимодействия и трансфера технологий, имел устойчивый прирост и отражался степенной моделью тренда, являющейся легкой в

интерпретации, в то время как производительность труда и себестоимость выпускаемой продукции были подвержены колебаниям, поэтому динамика их отражается уравнением ряда Фурье с одной гармоникой, а объем необходимого оборудования в стоимостном выражении хотя и имел прирост, но этот прирост был незначительным и неравномерным, поэтому для характеристики его динамики также использовалось уравнение ряда Фурье с одной гармоникой, диссертант посчитал нужным проведение дополнительных вычислений для получения четкой характеристики конкурентоспособности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация» в оцениваемый период. С этой целью был выявлен наиболее благоприятный год оцениваемого периода (2016-2018 гг.) с позиции конкурентоспособности исследуемого кластера на основе применения метода TOPSIS, а также проведено ранжирование годов по конкурентоспособности и сопоставление полученных результатов с активностью центра координации взаимодействия и трансфера технологий в области реализации предложенного механизма трансфера технологий.

Метод TOPSIS впервые был разработан Ч.Л. Хван, К.П. Юн в 1981 году как метод принятия решений [13]. Свое название метод получил от аббревиатуры TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – техника предпочтения в порядке близости к идеальному решению. Идея метода TOPSIS состоит в выборе альтернативы, наиболее близкой к позитивному идеальному решению и наиболее отдаленной от негативного идеального решения [1, 2, 3, 11, 14]. Алгоритм применения метода TOPSIS состоит из следующих последовательных этапов.

Этап 1. Построение матрицы решений.

Матрица решений $X = (x_{ij})$ состоит из числовых значений каждой альтернативы по каждому критерию, где i – номер альтернативы, $i=1, \dots, m$; j – номер критерия, $j=1, \dots, n$, $n=5$. Данная матрица имеет вид (5):

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Этап 2. Построение нормализованной матрицы решений $R=(r_{ij})$ (6, 7):

$$\begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (7)$$

Этап 3. Определение веса каждого критерия (w_j).

Этап 4. Построение взвешенной нормализованной матрицы решений $V=(v_{ij})$ путем умножения значений нормализованной матрицы решений r_{ij} на веса критериев w_j (8, 9):

$$\begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$v_{ij} = r_{ij}w_j \quad (9)$$

Этап 5. Определение позитивного идеального решения A^+ и негативного идеального решения A^- по каждому критерию. Для критериев, которые необходимо максимизировать, позитивное и негативное идеальное решение определяются по следующим формулам (10, 11):

$$A^+ = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+] = [\max v_{i1} \max v_{i2} \max v_{in}] \quad (10)$$

$$A^- = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-] = [\min v_{i1} \min v_{i2} \min v_{in}] \quad (11)$$

Для критериев, требующих минимизации, позитивное и негативное идеальное решение определяется по формулам (12, 13):

$$A^+ = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-] = [\min v_{i1} \min v_{i2} \min v_{in}] \quad (12)$$

$$A^- = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+] = [\max v_{i1} \max v_{i2} \max v_{in}] \quad (13)$$

Этап 6. Расчет расстояния каждой альтернативы от позитивного S_i^+ и от негативного идеального решения S_i^- на основе евклидова расстояния (14, 15) [10, 11]:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_i^+ - v_{ij})^2} \quad (14)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_i^- - v_{ij})^2} \quad (15)$$

Этап 7. Расчет относительной близости к позитивному идеальному решению C_i для каждой альтернативы (16):

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (16)$$

Этап 8. Ранжирование альтернатив по относительной близости к позитивному идеальному решению C_i и выбор альтернативы с максимальным значением C_i .

В последние годы метод TOPSIS имеет широкий спектр различных направлений применения. В числе этих направлений оценка каждого года в оцениваемом периоде на предмет благоприятности с определенной точки зрения [6] и оценка конкурентоспособности кластера [9]. Для определения наиболее благоприятного года с позиции конкурентоспособности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация» были выполнены действия, согласно представленному алгоритму. Матрица решений представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1

Матрица решений, содержащая числовые значения критериев конкурентоспособности в судостроительном кластере «Объединенная судостроительная корпорация»

Год	Доля рынка (в %)	Производительность труда (тыс. руб./чел.)	Объем необходимого оборудования в стоимостном выражении (тыс. руб.)	Себестоимость выпускаемой продукции (млн. руб)
2016	85	3151,2	892900	9211
2017	89	2387,4	1218501	8409
2018	92	3497,3	1384492	12269

Значения, представленные в таблице 1, были нормализованы и вычислены веса критериев по методу энтропии. При этом, как и при определении конкурентоспособности реализуемых инновационных проектов, использовались

обозначения, соответственно e_k , Z_{ik} , X_{ik} и U_k . Нормализованные значения критериев конкурентоспособности и их веса представлены в таблице 2.

Таблица 2

Нормализованные значения r_{ij} критериев конкурентоспособности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация» и их веса

Год	Доля рынка	Производительность труда	Объем необходимого оборудования в стоимостном выражении	Себестоимость выпускаемой продукции
2016	0,553	0,597	0,436	0,526
2017	0,579	0,452	0,595	0,481
2018	0,599	0,663	0,676	0,701
ek	0,9996	0,989	0,985	0,988
1-ek	0,0004	0,011	0,015	0,012
yk	0,01	0,286	0,391	0,3125

На основе нормализованных значений r_{ij} критериев конкурентоспособности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация» и их весов была построена взвешенная нормализованная матрица решений и определены позитивное идеальное решение и негативное идеальное решение, с учетом

того, что три критерия конкурентоспособности – доля рынка, производительность труда и объем необходимого оборудования (в стоимостном выражении) нуждаются в максимизации, в то время как один критерий – себестоимость выпускаемой продукции нуждается в минимизации (таблица 3).

Таблица 3

Взвешенная нормализованная матрица решений $V=(v_{ij})$ и позитивное и негативное идеальные решения

Год	Доля рынка	Производительность труда	Объем необходимого оборудования в стоимостном выражении	Себестоимость выпускаемой продукции
2016	0,00553	0,170742	0,170476	0,164375
2017	0,00579	0,129272	0,232645	0,1503125
2018	0,00599	0,189618	0,264316	0,2190625
Позитивное идеальное решение v_i^+	0,00599	0,189618	0,264316	0,1503125
Негативное идеальное решение v_i^-	0,00553	0,129272	0,170476	0,2190625

На основе значений, представленных в таблице 3, были рассчитаны расстояние от позитивного идеального решения S_i^+ и расстояние от негативного идеального решения S_i^- для каждого года, затем была определена относительная близость к

позитивному идеальному решению S_i , и проведено ранжирование годов оцениваемого периода. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Относительная близость к позитивному идеальному решению и ранжирование годов оцениваемого периода

Год	Расстояние от позитивного идеального решения S_i^+	Расстояние от негативного идеального решения S_i^-	Относительная близость к позитивному идеальному решению S_i	Ранжирование годов
2016	0,096748204	0,043789439	0,311585125	3
2017	0,068152271	0,09269097	0,576281412	2
2018	0,004726563	0,1115697	0,959357568	1

Как показывает таблица 4, наиболее благоприятным с позиции конкурентоспособности

был 2018 год. В этом году деятельность центра координации взаимодействия и трансфера

технологий, связанная с реализацией предложенного механизма трансфера технологий, была наиболее активной, что нашло отражение в выполнении центром функций всех блоков: координация и регулирование деятельности инновационно-промышленного кластера, шеринг знаний и иной информации и трансформация знаний и иной информации. Данный факт позволяет говорить о существенной роли реализации предложенного механизма трансфера технологий и функционирования центра координации

взаимодействия и трансфера технологий как его главного инструмента в обеспечении и росте конкурентоспособности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация». При этом наблюдается существенный рост показателя относительной близости каждого оцениваемого года к позитивному идеальному решению S_i , характеризующего благоприятность года с позиции конкурентоспособности. Это проиллюстрировано на рисунке 1.



Рис. 1 - Динамика показателя относительной близости годов к позитивному идеальному решению S_i в период 2016-2018 гг.

На основе апробирования различных уравнений тренда было выявлено, что с позиции критерия Дарбина-Уотсона, устанавливающего адекватность уравнений тренда, адекватной моделью тренда, отражающей динамику конкурентоспособности инновационного проекта P_2 в исследуемом инновационно-промышленном кластере в период с 2016 по 2018 год, является степенной тренд, выраженный уравнением $y_t = a_0 t^{a_1}$. Для нахождения параметров уравнения степенного тренда $y_t = a_0 t^{a_1}$ по методу наименьших квадратов данное уравнение было линеаризовано при помощи логарифмирования. Поскольку относительная близость к позитивному идеальному решению S_i , как и другие меры расстояний, получаемые в рамках применения метода TOPSIS – расстояние от позитивного идеального решения S_i^+ , расстояние от негативного идеального решения S_i^- – измеряются в целых числах и их малых, иногда миллионных, долях, и числовое значение каждой из этих мер в отношении конкретной альтернативы может на миллионные доли отличаться от числовых значений

в отношении других альтернатив, в роли которых в настоящем исследовании выступают годы оцениваемого периода, округление при применении трендовой модели для оценки динамики S_i не проводилось. Поэтому система уравнений МНК имеет вид (17):

$$\begin{cases} 3a_0 + 1,789a_1 = -1,758733298 \\ 1,789a_0 + 1,683901a_1 = -0,4258989 \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом (18, 19, 20, 21):

$$a_1 = \frac{n \sum \ln t \cdot \ln y - \sum \ln t \sum \ln y}{n \sum (\ln t)^2 - \sum \ln t \sum \ln t} = \frac{3 \cdot -0,4258989 - 1,789 \cdot -1,758733298}{3 \cdot 1,683901 - 1,789 \cdot 1,789} = \frac{1,86867717}{1,851182} = 1,0094508 \quad (18)$$

$$\ln a_0 = \frac{1}{n} \sum \ln y - \frac{1}{n} a_1 \sum \ln t = -0,586244433 -$$

$$0,601969166 = -1,188213599 \quad (19)$$

$$a_0 = e^{-1,188213599} = 0,304765211 \quad (20)$$

$$y_t = 0,304765211 \cdot t^{1,00945081} \quad (21)$$

Результаты расчетов по выравниванию ряда динамики относительной близости годов оцениваемого периода к позитивному идеальному решению S_i представлен в таблице 5.

Таблица 5

Выравнивание ряда динамики относительной близости к позитивному идеальному решению в 2016-2018 гг. по степенной функции

Год функционирования центра координации взаимодействия и трансфера технологий t	Относительная близость к позитивному идеальному решению S_i y	t	ln y	ln t	ln t ²	ln t*ln y	Выровненные уровни $y_t = 0,304765211 \cdot t^{1,00945081}$
2016	0,311585125	1	-1,16608 2704	0	0	0	0,304765211
2017	0,576281412	2	-0,55115 9175	0,69	0,4761	-0,3802 99831	0,613536442
2018	0,959357568	3	-0,04149 1419	1,099	1,20780 1	-0,0455 99069	0,923838012
Σ	1,847224105	6	-1,75873 3298	1,789	1,68390 1	-0,4258 989	1,842139665

Значение критерия Дарбина-Уотсона составляет $d = 2,68$, что выше значения d_2 , указанного в таблице значений данного критерия при 5 % уровне значимости, но, при этом, незначительно превышает значение $4-d_2$, равное 2,64, и существенно ниже значения $4-d_1$, равного 2,92. Это, с точки зрения авторов, может служить аргументом в пользу принятия гипотезы об отсутствии автокорреляции и признания адекватным уравнения тренда $u_t = 0,304765211 * t^{1,00945081}$. Адекватность уравнения тренда также подтверждается близостью значений u и u_t .

Среднегодовой прирост значений относительной близости к позитивному идеальному решению S_i составил (22):

$$\bar{T} = 100 \sqrt[3]{t^{a_1}} - 1 = (\sqrt[3]{3^{1,00945081}} - 1) * 100 = 74,11 \% \quad (22)$$

Таким образом, показатель относительной близости годов оцениваемого периода к позитивному идеальному решению, характеризующий благоприятность каждого года в отношении конкурентоспособности деятельности судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация», в оцениваемый период возрастал, в среднем, на 74,11 % и к 2018 году, являющемуся последним годом данного периода, достиг почти предельного значения, равного 1. Из этого можно заключить, что конкурентоспособность судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация», несмотря на колебания отдельных показателей конкурентоспособности и негативные изменения (рост) себестоимости выпускаемой продукции, снижение которой является одним из факторов конкурентоспособности кластера, имеет тенденцию к существенному росту.

Заключение

На основе исследования, проведенного на примере судостроительного кластера «Объединенная судостроительная корпорация», можно сделать вывод: механизм трансфера технологий, состоящий в формировании в рамках инновационно-промышленного кластера центра координации взаимодействия и трансфера

технологий и выполнении им трех блоков функций – координация и регулирование деятельности инновационно-промышленного кластера, шеринг знаний и иной информации и трансформация знаний и иной информации – играет важную роль в обеспечении и росте конкурентоспособности инновационно-промышленного кластера, выраженной как в конкурентоспособности реализуемых им инновационных проектов, так и в конкурентоспособности деятельности, определяемой на основе оценки экономических показателей. Дополнительным аргументом в пользу данного утверждения является тот факт, что именно в год наиболее активной деятельности центра координации взаимодействия и трансфера технологий в области реализации предложенного механизма – 2018 год – были выявлены наиболее высокие значения показателей конкурентоспособности реализуемых инновационных проектов и, кроме того, анализ годов оцениваемого периода, проведенный при помощи метода TOPSIS, выявил, что именно этот год является наиболее благоприятным в отношении конкурентоспособности деятельности исследуемого кластера. Данное обстоятельство объясняется тем, что в результате реализации предложенного механизма трансфера технологий посредством выполнения центром координации взаимодействия и трансфера технологий своих функций, относящихся к блокам «Координация и регулирование деятельности инновационно-промышленного кластера», «Шеринг знаний и иной информации» и «Трансформация знаний и иной информации», происходит усиление связей между организациями-участниками, активное и интенсивное получение каждой из них необходимых знаний, которые применяются ими в рамках осуществления производственного процесса, что способствует росту производительности труда, повышению качества производимой продукции и, как следствие, удержанию и расширению доли рынка, и, кроме того, различных видов иной информации, в число которых входит информация о возможностях приобретения нового оборудования и обновления основных фондов.

Литература

1. Балабанова Е.С., Грудзинский А.О. Институциональные условия трансфера технологий // Социологические исследования. – 2001. – № 4. – С. 39-48
2. Виттих В.А. Эволюционное управление сложными системами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2000. – т. 2. – № 1. – С. 53-65
3. Владыка М.В. К вопросу о необходимости становления системы трансфера знаний и технологий на основе инновационного потенциала ведущих вузов России // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: экономика, информатика. – 2009. – т. 12. – № 15-1. – С. 70-80
4. Воробьев В. П., Платонов В. В., Рогова Е. М. Инновационный менеджмент: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета экономики и финансов, 2005. – 115 с.
5. Грудзинский А.О., Бедный А.Б. Трансфер знаний – функция инновационного университета // Высшее образование в России. – 2009. – № 9. – С. 66-71
6. Егорова М.В. Особенности функционирования инновационного кластера в регионе // Российское предпринимательство. – 2007. – № 7 (1). – С. 19-23
7. Ермак В.Н. Теория механизмов и машин. Кемерово, 2011. – 164 с.
8. Мороз В. (2020) Роль адаптации в успешном осуществлении трансфера технологий в инновационном кластере и механизм ее проведения // *Вестник Таджикского государственного университета права бизнеса и политики. Серия общественных наук.* №1. С. 78-88 [Moroz, V. (2009) The role of adaptation in successful implementation of technology transfer in innovative cluster and mechanisms of its performance. *Bulletin of TSU LBP. Series of Social Sciences, 1, 78-88.* (in Russian).]
9. Мутанов Г.М., Есенгалиева Ж.С. Метод оценки инновационности и конкурентоспособности инновационных

- проектов // Фундаментальные исследование: экономические науки. – 2012. – № 3. – С. 712-717. (44)
10. Чаплыгин В., Мороз В. (2015) Методика оптимального выбора партнера для реализации инновационного проекта в условиях информационной асимметрии // *Вестник Калининградского филиала Санкт-Петербургского университета МВД России*. №3 (41). С. 107–110. [Chaplygin, V.G. & Moroz, V.N. (2015). Technique of an Optimum Choice of the Partner selection for implementation of the Innovative Project in the conditions of information asymmetry. *Bulletin of the Kaliningrad branch of the Saint-Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 3(41), 107-110. (in Russian).]
 11. Чаплыгин В. (2004) Устойчивость и равновесие, кооперация и координация в глобальном пространстве Дж. Нэш versus Г. Штакельберг // *Известия Томского политехнического университета*. №2. С. 173-176. [Chaplygin, V.G. (2004). Sustainability and Equilibrium, Cooperation and Coordination: J. Nash Versus H. Stackelberg. *The News of Tomsk Polytechnic University*, 2(307), 173–176. (in Russian).]
 12. Lo S., Chen J., Liu T. (2018) Response to Demand Uncertainty of Supply Chains: a Value-Focused Approach with AHP and TOPSIS // *International Journal of Industrial Engineering*. Vol. 25. № 6. P. 739-756.
 13. Hwang C.L., Yoon K. (1981) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. – 269 p.
 14. Li Y., Wu T., Mao J., Guo H., Yao A. (2020) A Method of Uncertainty Measurements for Multidimensional Z-number and Their Applications // *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/8407830/> (дата обращения: 28.04.2020). – doi.org/10.1155/2020/8407830.

References

1. Balabanova E.S., Grudzinskiy A.O. Institutstional'nye usloviya transfera tekhnologiy [Institutional conditions for technology transfer]. *Sotsiologicheskie issledovaniya*. – 2001. – № 4. – S. 39-48
2. Vittikh V.A. Evolyutsionnoe upravlenie slozhnymi sistemami [Evolutionary management of complex systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. – 2000. – t. 2. – № 1. – S. 53-65
3. Vladyka M.V. K voprosu o neobkhodimosti stanovleniya sistemy transfera znaniy i tekhnologiy na osnove innovatsionnogo potentsiala vedushchikh vuzov Rossii [On the need to establish a system of knowledge and technology transfer based on the innovative potential of leading Russian universities]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: ekonomika, informatika*. – 2009. – t. 12. – № 15-1. – S. 70-80
4. Vorob'ev V. P., Platonov V. V., Rogova E. M. Innovatsionnyy menedzhment: uchebnoe posobie [Innovation Management: A Study Guide]. – SPb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta ekonomiki i finansov, 2005. – 115 s.
5. Grudzinskiy A.O., Bednyy A.B. Transfer znaniy – funktsiya innovatsionnogo universiteta [Knowledge transfer is a function of an innovative university]. *Vysshee obrazovanie v Rossii*. – 2009. – № 9. – S. 66-71.
6. Egorova M.V. Osobennosti funktsionirovaniya innovatsionnogo klastera v regione [Features of the functioning of the innovation cluster in the region]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo*. – 2007. – № 7 (1). – S. 19-23.
7. Ermak V.N. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Kemerovo, 2011. – 164 s.
8. Moroz V. (2020) Rol' adaptatsii v uspešnom osushchestvlenii transfera tekhnologiy v innovatsionnom klasterе i mekhanizm ee provedeniya [The role of adaptation in successful implementation of technology transfer in innovative cluster and mechanisms of its performance]. *Vestnik Tadzhikskogo gosudarstvennogo universiteta prava biznesa i politiki. Seriya obshchestvennykh nauk*. №1. S. 78-88
9. Mutanov G.M., Esengalieva Zh.S. Metod otsenki innovatsionnosti i konkurentosposobnosti innovatsionnykh proektov. *Fundamental'nye issledovanie: ekonomicheskie nauki*. – 2012. – № 3. – S. 712-717.
10. Chaplygin V., Moroz V. (2015) Metodika optimal'nogo vybora partnera dlya realizatsii innovatsionnogo proekta v usloviyakh informatsionnoy asimmetrii [Technique of an Optimum Choice of the Partner selection for implementation of the Innovative Project in the conditions of information asymmetry]. *Vestnik Kaliningradskogo filiala Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii*. №3 (41). S. 107–110.
11. Chaplygin V. (2004) Ustoychivost' i ravnovesie, kooperatsiya i koordinatsiya v global'nom prostranstve Dzh. Nesh versus G. Shtakel'berg [Sustainability and Equilibrium, Cooperation and Coordination: J. Nash Versus H. Stackelberg]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. №2. S. 173-176.
12. Lo S., Chen J., Liu T. (2018) Response to Demand Uncertainty of Supply Chains: a Value-Focused Approach with AHP and TOPSIS. *International Journal of Industrial Engineering*. Vol. 25. № 6. P. 739-756.
13. Hwang C.L., Yoon K. (1981) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981. – 269 p.
14. Li Y., Wu T., Mao J., Guo H., Yao A. (2020) A Method of Uncertainty Measurements for Multidimensional Z-number and Their Applications // *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2020. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/8407830/> (date of application: 28.04.2020). – doi.org/10.1155/2020/8407830.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Елена Валерьевна Каранина, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедры финансов и экономической безопасности, Вятский государственный университет, 610000, Киров, ул. Московская, 36, e-mail: kafinanc@yandex.ru

Elena V. Karanina, Dr.Sci. (Econ), Professor, Head of Finance and Economic Security Department, Vyatka State University, 610000, Kirov, st. Moscow, 36, e-mail: kafinanc@yandex.ru

Владимир Германович Чаплыгин, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры финансов и экономической безопасности, Вятский государственный университет, 610000, Киров, ул. Московская, 36, e-mail: chaplygin.vladimir@gmail.com

Vladimir G. Chaplygin, Dr.Sci. (Econ), Professor, Professor of Finance and Economic Security Department, Vyatka State University, 610000, Kirov, st. Moscow, 36, e-mail: chaplygin.vladimir@gmail.com

Вадим Николаевич Мороз, преподаватель кафедры финансов и экономической безопасности, Вятский государственный университет, 610000, Киров, ул. Московская, 36, e-mail: morozvadim@rambler.ru

Vadim N. Moroz, Graduate student, Finance and Economic Security Department, 610000, Kirov, st. Moscow, 36, e-mail: morozvadim@rambler.ru

Поступила в редакцию: 19.03.2021

Принята к публикации: 05.05.2021

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

УДК 656.001.5

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.024>

Математическая модель динамики судна на подводных крыльях, как сложной технической системы

Д.А. Скороходов^{1,2} e-mail: skorohodda@mail.ru, Ю.Е. Крылов¹ e-mail: krylov_yuriy@mail.ru, А.Л. Стариченков² e-mail: alstar72@yandex.ru¹Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, ²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Определена структура единой среды моделирования, состоящая из трёх блоков: блок, где задаются или формируются значения исследуемых параметров, влияющие на выходные показатели судна, как объекта моделирования, блок представляющий собой ядро единой среды моделирования и блок, где формируется совокупность тех или иных показателей, подлежащих анализу. Определена математическая модель динамики возмущенного движения СПК, при этом использованы следующие системы координат: земная прямоугольная горизонтальная правая, связанная с судном прямоугольная правая и вспомогательная нецентральная прямоугольная правая. Определены основные допущения математической модели. Представлены уравнения динамики судна на подводных крыльях в общем виде и определены силы и моменты, действующие на судно на подводных крыльях в крыльевом режиме движения. Гидродинамические силы и моменты, возникающие на каждом из крыльевых устройств, определены расчетным путем. Работа движителей моделируется заданием среднего упора, направленного по оси вала движителя и параллельного диаметральной плоскости судна. В модели динамики предусмотрена возможность задания аэродинамических сил и моментов, действующие на СПК в крыльевом режиме. Разработана математическая модель электрогидравлического привода, состоящая из суммирующего устройства, электрогидроусилителя и силового интегрирующего привода, охваченных общей обратной связью по положению и скорости перемещения, а также модель системы управления движением, которая является одной из важнейших подсистем СПК, формирующей алгоритмы управления, поступающие на входы ЭГП соответствующих ИО, расположенных на несущих поверхностях КУ. При решении некоторых задач, связанных с проектированием СПК и его технических систем, особенно для получения оценочных значений фазовых координат судна на начальных этапах проектирования или решения специальных задач, разработана линеаризованная система дифференциальных уравнений объекта.

Ключевые слова: модель, момент, параметр, показатель, привод, сила, среда моделирования, судно.

Mathematical model of the dynamics of a hydrofoil vessel as a complex technical system

Dmitriy A. Skorokhodov^{1,2} e-mail: skorohodda@mail.ru, Yuriy E. Krylov¹ e-mail: krylov_yuriy@mail.ru, Aleksey L. Starichenkov² e-mail: alstar72@yandex.ru¹Institute of transport problems N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, ²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Abstract. The structure of a unified modeling environment has been determined, which consists of three blocks: a block where the values of the studied parameters are set or formed, which affect the output indicators of the vessel as an object of modeling, a block that is the core of a unified modeling environment and a block where a set of certain indicators is formed. analysis. A mathematical model of the dynamics of the disturbed motion of the SPK was determined, with the following coordinate systems used: earth rectangular horizontal right, rectangular right connected to the ship and auxiliary off-center rectangular right. The basic assumptions of the mathematical model are determined. The equations of the dynamics of a hydrofoil ship in general form are presented and the forces and moments acting on a hydrofoil ship in the wing mode of motion are determined. The hydrodynamic forces and moments arising on each of the wing devices are determined by calculation. The operation of the propellers is modeled by setting the middle stop directed along the axis of the propeller shaft and parallel to the diametral plane of the vessel. The dynamics model provides for the possibility of setting aerodynamic forces and moments acting on the HFV in the wing mode. A mathematical model of an electrohydraulic drive has been developed, consisting of a summing device, an electrohydraulic amplifier and a power integrating drive, covered by a general feedback on the JJposition and speed of movement, as well as a model of a motion control system, which is one of the most important subsystems of the SPC that forms control algorithms entering the EGP inputs of the corresponding EUT located on the bearing surfaces of the KU. When solving some problems related to the design of the HFV and its technical systems, especially for obtaining the estimated values of the phase coordinates of the vessel at the initial stages of design or solving special problems, a linearized system of differential equations of the object was developed.

Keywords: model, moment, parameter, indicator, drive, force, simulation environment, vessel.

Введение

В [1] на основе задач исследования судна на подводных крыльях (СПК) как сложной технической системы и общих требований к единой среде моделирования выбран вид обобщенной мате-

матической модели, разработана ее структура и методы построения. Указанная среда фактически является средством анализа зависимости множества показателей $J_{спк}$ от множества внутренних и

внешних параметров $P_{спк}$. Поэтому структура единой среды моделирования должна включать три блока.

В первом блоке, в зависимости от целей модельного эксперимента, задаются или формируются значения исследуемых параметров (факторов), влияющие на выходные показатели $J_{спк}$ судна как объекта моделирования.

Второй блок представляет собой ядро единой среды моделирования. В нем реализуется обобщенная математическая модель динамики судна, произвольно маневрирующего в пространстве под действием реальных внешних возмущений.

В зависимости от решаемой задачи, по результатам моделирования в третьем блоке формируется совокупность тех или иных показателей, подлежащих анализу.

Эти три блока являются основой разрабатываемой среды моделирования. Полученные в результате моделирования показатели предназначены для проведения сравнительного анализа вариации различных внутренних и внешних факторов, влияющих на безопасность и эффективность функционирования судна как высокоскоростного транспортного средства [2, 3]. Указанные показатели могут быть использованы также для формирования различных критериев качества и эффективности функционирования судна. На основе произведенных оценок эксплуатационных показателей проектантом производится обоснованный выбор конкретных конструктивных элементов судна и его технических систем.

Следует заметить, что при таком построении среды моделирования, ее ядро - обобщенная нелинейная математическая модель - является законченным блоком и может быть использована (при соответствующей замене интерфейса) для решения других задач, не связанных с проектированием судна или оценкой его безопасности. Например, указанная модель может быть использована как ядро тренажера для судоводителей.

1. Математическая модель динамики возмущенного движения судна на подводных крыльях

1.1. Системы координат

При составлении математической модели динамики возмущенного движения СПК использованы следующие системы координат:

- земная прямоугольная горизонтальная правая $O\xi\eta\zeta$. Основная плоскость $O\xi\zeta$ совмещена с плоскостью невозмущенной водной поверхности; начало координат – неподвижная точка на ней. Ось $O\xi$ лежит в основной плоскости $O\xi\zeta$ и направлена произвольно, ось $O\eta$ - вверх по местной вертикали;

- связанная с судном прямоугольная правая $Oxuz$ с центром в центре масс (ЦМ) судна. Основная плоскость – плоскость Oxu вертикальной симметрии судна. Ось Ox параллельна основной плоскости судна (ОП) и направлена в нос, Oz - на правый борт;

- вспомогательная нецентральная прямоугольная правая система $\tilde{O}_i\tilde{x}_i\tilde{y}_i\tilde{z}_i$ с началом координат в точке \tilde{O}_i , жестко связанной с i -м КУ и имеющей координаты $[x_i, y_i, z_i]$ в системе $Oxuz$.

Основная плоскость $\tilde{O}_i\tilde{x}_i\tilde{z}_i$ параллельна плоскости водной поверхности над i -м крыльевым устройством (КУ). Ось $\tilde{O}_i\tilde{x}_i$ параллельна плоскости $O\xi\zeta$ и направлена в противоположную скорости движения сторону, ось $\tilde{O}_i\tilde{z}_i$ - в направлении левого борта, $\tilde{O}_i\tilde{y}_i$ - перпендикулярно основной плоскости вверх.

Применение вспомогательной системы обусловлено тем, что в ней определены гидродинамические характеристики (ГДХ) каждого из крыльевых устройств (КУ). Кроме того, следует особо отметить, что в расчетах динамики предполагается, что в начальный момент времени центр масс судна в земной системе $O\xi\eta\zeta$ имеет координаты $[0, \eta_0, 0]$, а плоскости $O\xi\eta$ и Oxu совпадают.

В соответствии с правилом знаков для правой системы координат положительными углами и угловыми скоростями считаются: угол дифферента – на корму, курса – влево, крена – на правый борт. Угол дрейфа на КУ принят положительным при натекании потока с правого борта.

Генеральное распространение волн и ветра задается в соответствии со следующим правилом:

- $\chi = 0^\circ$ ($\chi_a = 0^\circ$) – встречное волнение (ветер);
- $\chi = 90^\circ$ ($\chi_a = 90^\circ$) – волнение (ветер) с правого борта;
- $\chi = 180^\circ$ ($\chi_a = 180^\circ$) – попутное волнение (ветер).

При составлении обобщенной математической модели динамики СПК приняты следующие основные допущения:

- рассматривается движение СПК с заданной постоянной скоростью в основном эксплуатационном - крыльевом режиме,
- судно рассматривается как абсолютно жесткое тело постоянной массы,
- контакт корпуса с водой отсутствует,
- оси связанной системы координат $Oxuz$ совпадают с главными центральными осями инерции судна, т.е. $J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = 0$,

- углы ψ, α_i, β_i считаются малыми, поэтому для них справедливо допущение: $\sin(x) = x$, $\cos(x) = 1$,
- произведения и квадраты угловых скоростей считаются величинами второго порядка малости,
- длина волны существенно превышает продольные габариты КУ.

1.2. Уравнения динамики судна на подводных крыльях в общем виде

Динамические свойства СПК в крыльевом режиме движения, как твердого тела, движущегося в пространстве, описываются в связанной системе координат векторными уравнениями Эйлера [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{B}}{dt} + [\vec{W} \times \vec{B}] &= \vec{F} \\ \frac{d\vec{N}}{dt} + [\vec{W} \times \vec{N}] + [\vec{V} \times \vec{B}] &= \vec{M} \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{B} – главный вектор количества движения тела;
 \vec{N} – главный момент количества движения;
 \vec{F} – главный вектор внешних сил;
 \vec{M} – главный момент внешних сил;
 \vec{V} – вектор скорости поступательного движения ЦТ судна;
 \vec{W} – вектор угловой скорости вращательного движения относительно ЦТ.

Проектируя выражения (1) на оси связанной системы координат, $Oxyz$, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dB_x}{dt} + \omega_y B_z - \omega_z B_y &= F_x, \\ \frac{dB_y}{dt} + \omega_z B_x - \omega_x B_z &= F_y, \\ \frac{dB_z}{dt} + \omega_x B_y - \omega_y B_x &= F_z, \\ \frac{dN_x}{dt} + \omega_y N_z - \omega_z N_y + V_y B_z - V_z B_y &= M_x, \\ \frac{dN_y}{dt} + \omega_z N_x - \omega_x N_z + V_z B_x - V_x B_z &= M_y, \\ \frac{dN_z}{dt} + \omega_x N_y - \omega_y N_x + V_x B_y - V_y B_x &= M_z. \end{aligned} \quad (2)$$

Проекции векторов \vec{B}, \vec{N} на оси $Oxyz$ выражаются через кинетическую энергию системы следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= \frac{1}{(m + \lambda_{11})} [F_x - \omega_y V_z (m + \lambda_{33}) + \omega_z V_y (m + \lambda_{22})], \\ \dot{V}_y &= K \{ [F_y - \omega_z V_x (m + \lambda_{11}) + \omega_x V_z (m + \lambda_{33})] (J_z + \lambda_{66}) - M_z \lambda_{26} \}, \\ \dot{V}_z &= \frac{1}{(m + \lambda_{33})} [F_z - \omega_x V_y (m + \lambda_{22}) + \omega_y V_x (m + \lambda_{11})], \end{aligned} \quad (6)$$

здесь:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \frac{1}{(J_x + \lambda_{44})} [M_x - \lambda_{26} (\omega_y V_y - \omega_z V_z)], \\ \dot{\omega}_y &= \frac{1}{(J_y + \lambda_{55})} [M_y + \lambda_{26} \omega_x V_y], \\ \dot{\omega}_z &= K \{ (m + \lambda_{22}) M_z - \lambda_{26} [F_y - \omega_z V_x (m + \lambda_{11}) + \omega_x V_z (m + \lambda_{33})] \}, \end{aligned}$$

где $K = \frac{1}{(m + \lambda_{22})(J_z + \lambda_{66}) - \lambda_{26}^2}$.

Кинематические уравнения связи между параметрами движения судна в земной $O\xi\eta\zeta$ и связанной $Oxyz$ системах координат имеют вид:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial E}{\partial V_x}, \quad B_y = \frac{\partial E}{\partial V_y}, \quad B_z = \frac{\partial E}{\partial V_z}, \\ N_x &= \frac{\partial E}{\partial \omega_x}, \quad N_y = \frac{\partial E}{\partial \omega_y}, \quad N_z = \frac{\partial E}{\partial \omega_z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $E = E_1 + E_2$, (E_1 – кинетическая энергия судна, E_2 – кинетическая энергия жидкости).

С учетом принятых допущений получаем:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{2} [m(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) + J_x \omega_x^2 + J_y \omega_y^2 + J_z \omega_z^2] \\ E_2 &= \frac{1}{2} V^T \Lambda V \end{aligned} \quad (4)$$

где, $V^T = \|V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z\|$,

Λ – матрица присоединенных масс, $\lambda_{26} = \lambda_{62}$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} & 0 \\ 0 & \lambda_{62} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Совершив необходимые преобразования и опустив величины второго порядка малости, получим уравнения пространственного движения СПК в связанной системе координат следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= V_x \cos \varphi + V_y \sin \varphi \sin \theta + V_z \sin \varphi \cos \theta, \\ \dot{\eta} &= V_x \psi + V_y \cos \theta - V_z \sin \theta, \\ \dot{\zeta} &= -V_x \sin \varphi + V_y (\cos \varphi \sin \theta + \psi \sin \varphi \cos \theta) + V_z \cos \varphi \cos \theta, \\ \dot{\theta} &= \omega_x, \\ \dot{\varphi} &= \omega_y \cos \theta, \\ \dot{\psi} &= \omega_y \sin \theta + \omega_z \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Совокупность уравнений (6) и (7) представляет математическую модель динамики пространственного движения СПК в общем виде. Скорость судна относительно невозмущенной поверхности воды и угол дрейфа определяются выражениями:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}, \\ \beta &= \frac{V_z}{V}. \end{aligned} \quad (8)$$

2. Силы и моменты, действующие на судно на подводных крыльях в крыльевом режиме движения

При составлении математической модели динамики СПК в крыльевом режиме, произвольно маневрирующего в пространстве над взволнованной водной поверхностью, будем рассматривать следующие основные категории сил и моментов [4]:

- вес судна G ;
- гидродинамические F_g, M_g ;
- силы и моменты, создаваемые движителями F_d, M_d ;
- аэродинамические F_a, M_a ;
- управляющие F_u, M_u ;
- возмущающие F_w, M_w .

Соответствующие результирующие вектора сил и моментов, действующих на судно, представляются в виде:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= G + \vec{F}_g + \vec{F}_d + \vec{F}_a + \vec{F}_u + \vec{F}_w, \\ \vec{M} &= \vec{M}_g + \vec{M}_d + \vec{M}_a + \vec{M}_u + \vec{M}_w. \end{aligned} \quad (9)$$

Спроектируем их на связанные оси.

Вес судна G дает следующие проекции на оси

$Oxyz$:

$$\begin{aligned} G_x &= -G\psi, \\ G_y &= -G \cos \theta, \\ G_z &= G \sin \theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Результирующие гидродинамическая сила и момент рассматриваются как сумма соответствующих сил и моментов, возникающих на каждом из КУ и зависящих от аргументов,

характеризующих положение этого КУ относительно поверхности воды и местные скосы потока α_i, β_i :

$$F_{gi} = F_{gi}(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i, \alpha_i, \beta_i, \bar{\omega}_x, \delta_{ij}, V) \quad (11)$$

$$M_{gi} = M_{gi}(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i, \alpha_i, \beta_i, \bar{\omega}_x, \delta_{ij}, V). \quad (12)$$

$$\alpha_i = \alpha_{ycmi} + \psi - \frac{1}{V_x}(\dot{\eta} + \psi x_i - \dot{\theta} y_i \sin \theta) + \alpha_{cki}. \quad (13)$$

$$\beta_i = \frac{1}{V}(V_z + \omega_x y_i \cos \theta - \omega_y x_i) + \beta_{ck}. \quad (14)$$

$$\bar{\omega}_x = \omega_x V \frac{l_i}{2}. \quad (15)$$

$$\hat{h}_i = h_i + h_{gi} + h_{cki}. \quad (16)$$

$$\hat{\theta}_i = \theta + \theta_{gi}. \quad (17)$$

Тогда в проекциях на связанные оси координат имеем:

$$\begin{aligned} X_g &= \sum_{i=1}^{N_w} X_{gi}, \\ Y_g &= \sum_{i=1}^{N_w} Y_{gi}, \\ Z_g &= \sum_{i=1}^{N_w} Z_{gi}, \\ M_{gx} &= \sum_{i=1}^{N_w} M_{gxi}, \\ M_{gy} &= \sum_{i=1}^{N_w} Z_{gi} x_i, \\ M_{gz} &= \sum_{i=1}^{N_w} Y_{gi} x_i - \sum_{i=1}^{N_w} X_{gi} y_i. \end{aligned} \quad (18)$$

В выражениях (11-18) использованы следующие обозначения:

N_w - количество КУ, определяемое компоновкой гидродинамического комплекса судна,

$\hat{h}_i, \hat{\theta}_i$ - заглубление и местный угол крена i -го КУ,

α_{ycmi} - установочный угол атаки i -го КУ,

α_i, β_i - местные угол атаки и дрейфа на i -м КУ,

$h_{cki}, \alpha_{cki}, \beta_{cki}$ - деформация водной поверхности и углы скоса потока, вызванные взаимодействием крыльев,

x_i, y_i - координаты точки приложения равнодействующей гидродинамических сил на i -м КУ относительно ЦМ.

$$c_{gi} = \left[c_i^0(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i) + c_i^\alpha(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i)\alpha_i + c_i^\beta(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i)\beta_i + c_i^\omega(\hat{h}_i, \hat{\theta}_i)\vec{\omega}_x \right], \quad (19)$$

где $c_i^0, c_i^\alpha, c_i^\beta, c_i^\omega$ - обобщенные коэффициенты гидродинамических сил и момента,

$$F_{gi} = c_{gi} \frac{\rho V^2}{2} S_i, M_{gi} = c_{gi} \frac{\rho V^2}{2} S_i l_i,$$

S_i, l_i - расчетная площадь и линейный размер КУ.

Работа двигателей моделируется заданием среднего упора T , направленного по оси вала двигателя и параллельного диаметральной плоскости судна (ДП) судна. С учетом этого проекции на связанные оси $Oxyz$ сил и моментов, создаваемых двигателями, имеют вид:

$$\begin{aligned} X_d &= \sum_{j=1}^{N_d} T_j \cos \psi_{dj}, \\ Y_d &= \sum_{j=1}^{N_d} T_j \sin \psi_{dj}, \\ Z_d &= 0, \\ M_{dx} &= 0, \\ M_{dy} &= \sum_{j=1}^{N_d} T_j \cos \psi_{dj} z_{dj}, \\ M_{dz} &= \sum_{j=1}^{N_d} T_j (\cos \psi_{dj} x_{dj} - \sin \psi_{dj} y_{dj}), \end{aligned} \quad (20)$$

где N_d - количество двигателей,

ψ_{dj} - угол наклона вала двигателя по отношению к ОП,

x_{dj}, y_{dj}, z_{dj} - точки приложения упора j -го двигателя относительно ЦТ.

Аэродинамические силы и моменты, действующие на СПК в крыльевом режиме, с учетом особенностей СПК как динамического объекта, незначительны по сравнению с гидродинамическими. Поэтому испытания в аэродинамической трубе или теоретические расчеты аэродинамических характеристик СПК, как правило, не производятся, а указанные силы в расчетах динамики не учитываются. Однако, при наличии необходимой информации их учет не представляет технических сложностей. С этой целью в модели динамики предусмотрена возможность задания

В настоящей статье гидродинамические силы и моменты, возникающие на каждом из крыльевых устройств, определяются расчетным путем.

Результаты расчетов представляются в следующем виде:

указанных сил и моментов, которые в проекциях на связанные оси представляются в виде зависимостей:

$$\begin{aligned} X_a &= X_a(V_a, \beta_a), \\ Y_a &\cong 0, \\ Z_a &= Z_a(V_a, \beta_a), \\ M_{ax} &= M_{ax}(V_a, \beta_a), \\ M_{ay} &= M_{ay}(V_a, \beta_a), \\ M_{az} &\cong 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Скорость судна относительно воздуха V_a и аэродинамический угол дрейфа β_a с учетом правила знаков определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} V_a &= V \sqrt{1 + \left(\frac{W_a}{V}\right)^2 + 2 \frac{W_a}{V} \cos \chi_a}, \\ \beta_a &= \beta + \arcsin\left(\frac{W_a}{V_a} \sin \chi_a\right), \\ \chi_a &= \beta + \varphi + \gamma_a. \end{aligned} \quad (22)$$

Управление СПК осуществляется путем создания дополнительных управляющих гидродинамических сил и моментов на элементах крыльевых устройств, имеющих соответствующие исполнительные органы (ИО): рули направления, закрылки, элероны. При наличии системы управления движением (СУД) управляющие воздействия, поступающие на ИО, можно разделить на внутренние $U_{упр}$ и внешние $W_{упр}$ управляющие воздействия.

$$\{U = U_{упр}, W_{упр}\}. \quad (23)$$

Внешние управляющие воздействия $W_{упр}$ (ручное управление ИО, принудительное отключение капитаном каких либо подсистем судна и пр.) поступают на ИО извне, в то время, как внутренние $U_{упр}$ вырабатываются подсистемами судна в соответствии с заложенными в них алгоритмами и определяются связями между соответствующими его элементами. В проекциях на связанные оси управляющие воздействия предоставляются в виде:

$$\begin{aligned}
 X_u &= \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_{\delta}} c_{xij}^{\delta_{ij}} \delta_{ij} = \sum_{i=1}^{N_w} X_{ui}, & M_{ux} &= \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_{\delta}} m_{xij}^{\delta_{ij}} \delta_{ij} = \sum_{i=1}^{N_w} M_{uxi}, \\
 Y_u &= \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_{\delta}} c_{yij}^{\delta_{ij}} \delta_{ij} = \sum_{i=1}^{N_w} Y_{ui}, & M_{uy} &= \sum_{i=1}^{N_w} (Z_{ui} x_i + X_{ui} z_i), \\
 Z_u &= \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_{\delta}} c_{zij}^{\delta_{ij}} \delta_{ij} = \sum_{i=1}^{N_w} Z_{ui}, & M_{uz} &= \sum_{i=1}^{N_w} (Y_{ui} x_i - X_{ui} y_i),
 \end{aligned} \tag{24}$$

где δ_{ij} – угол перекладки j-го ИО на i-ом КУ,

X_i, Y_i, Z_i – количество ИО на i-м КУ.

Внешние волновые возмущения учитываются в математической модели динамики СПК путем вычисления на каждом КУ:

- волнового приращения заглубления i-го КУ h_{ei} ;
- дополнительного угла крена θ_{ei} , определяющего изменение формы водной поверхности над i-ым КУ за счет волнения;
- возмущающих сил и моментов, возникающих на КУ при движении в поле скоростей частиц жидкости, неравномерно распределенном по размаху крыла.

Указанные переменные определяют величины дополнительных сил и моментов, возникающих на элементах гидродинамического комплекса (ГДК) вследствие волновых воздействий.

Внешние возмущения от воздействия ветра вводятся в модель динамики с учетом того, что гидродинамические силы, действующие на СПК в крыльевом режиме, существенно превышают аэродинамические, в том числе соответствующие возмущающие силы. Поэтому в расчетах динамики СПК в крыльевом режиме движения воздействием пульсации ветра можно пренебречь. С учетом этого ветровое возмущение моделируется порывам ветра путем задания в выражении (22) курсового угла ветра $Y_a = const$ и его скорости в виде зависимости $W_a(t)$, включающей постоянную составляющую и порыв.

3. Математическая модель приводов исполнительных органов

Как указывалось выше, внутренние $U_{упр}$ и внешние $W_{упр}$ управляющие силы и моменты создаются на элементах крыльевых устройств ГДК судна путем перекладки исполнительных органов. Перемещение ИО осуществляется на СПК с помощью соответствующих подсистем $\Sigma_{ЭГП}$ – электрогидравлических приводов (ЭГП) в соответствии с управляющими сигналами $\sigma_{суд}$, вырабатываемыми подсистемой $\Sigma_{суд}$ и поступающими на входы соответствующих ЭГП.

Каждый ЭГП рассматривается как следящая система, состоящая из суммирующего устройства, электрогидроусилителя и силового интегрирующего привода, охваченных общей обратной связью по положению и скорости перемещения. При описании

электрогидроусилителя учтены его инерционные и нелинейные характеристики, оказывающие влияние на работу замкнутого привода и, как следствие, на динамику управляемого движения СПК в целом как сложной технической системы $\Sigma_{СПК}$. К таким характеристикам относятся:

- $T_{Гу}$ – суммарная постоянная времени электромагнитного преобразователя и гидроусилителя,
- γ_1 – зона нечувствительности, связанная с перекрытием окон золотника,
- γ_2 – величина рассогласования, при которой наступает полное открытие окон управляющего золотника,
- $\gamma = \gamma_1/\gamma_2$ – отношение ширины зоны перекрытия окна золотника к величине его хода до полного открытия окна,
- K_c – коэффициент скоростной обратной связи,
- δ_{ij}^{max} – ограничение по скорости перекладки, определяемое максимальным расходом рабочей жидкости в системе гидравлики.

Одновременно с динамикой привода учитывается ограничение, накладываемое на входной сигнал управления σ_{ij} чтобы не допустить ударов ИО о механические упоры:

$$(\delta_{ij}^{min} \leq \sigma_{ij} \leq \delta_{ij}^{max}) \tag{25}$$

При моделировании ЭГП как подсистемы $\Sigma_{ЭГП}$, являющейся элементом СПК как сложной технической системы $\Sigma_{СПК}$, необходимо иметь в виду некоторые особенности принятой математической модели. Параметры δ_{ij}^{max} , $T_{Гу}$, после изготовления электрогидроусилителя, как правило, являются нерегулируемыми, в то время как параметры γ_2 , K_c определяются коэффициентами усиления на соответствующих входах суммирующего устройства и могут варьироваться в процессе проектирования системы управления, формирующей входные воздействия на ЭГП, с целью обеспечения желаемого качества замкнутого привода. Постоянная времени $T_{Гу}$ оказывает влияние на устойчивость замкнутого привода, поэтому при исследовании СПК, как сложной системы, целесообразно предварительно провести исследование изолированного ЭГП, как подсистемы СПК, и за счет соответствующего выбора параметров γ_2 и K_c обеспечить его устойчивую работу. После этого

влиянием постоянной времени $T_{Гу}$ на динамику привода можно пренебречь, полагая $T_{Гу} = 0$. Проверка замкнутого привода на устойчивость является необходимой, т.к. в противном случае стремление увеличить точность замкнутой системы объект-СУД может привести к недопустимому уменьшению величины γ_2 и, как следствие, к неустойчивости замкнутой системы «СПК – СУД – ЭГП».

В случае, когда влияние динамики ЭГП на характеристики функционирования СПК можно считать несущественными или если характеристики реального ЭГП неизвестны, моделирование динамики СПК может быть произведено с использованием «идеального» ЭГП. В этом случае привод рассматривается как звено с передаточной функцией, тождественно равной 1, с учетом ограничений на углы перекадки ИО (25).

4. Модель системы управления движением судна

Система управления движением $\Sigma_{СУД}$ является одной из важнейших подсистем СПК ($\Sigma_{СУД} \subset \Sigma_{СПК}$).

Целью ее функционирования является формирование алгоритмов управления $\sigma_{СУД}$, поступающих на входы ЭГП соответствующих ИО, расположенных на несущих поверхностях КУ.

Отклонения ИО в соответствии с указанными алгоритмами и создают дополнительные внутренние управляющие воздействия $U_{упр}$, направленные на улучшение динамических характеристик судна и, как следствие, повышение эффективности его функционирования [5-7].

Проектирование СУД предполагает решение двух взаимосвязанных задач – выбор алгоритмов управления каждым из имеющихся на крыльевых устройствах ИО и их конструктивная реализация. Реализуемая в данной статье математическая модель СУД предназначена для решения задач

$$X^T = \left\| \Delta\eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}, \dot{\eta}_n, \ddot{\eta}_n, \dot{\eta}_k, \ddot{\eta}_k, \Delta h_n, \Delta h_{cp}, \Delta h_k, \Delta\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}, \Delta\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \ddot{z}, V \right\| -$$

– вектор параметров движения судна и их производных,

Δx – индекс, обозначающий величину отклонения параметра x от заданного значения x_0 , т.е. $\Delta x = x - x_0$.

- нелинейные составляющие для задания нестандартных алгоритмов управления:

$$\sigma_{ij}^N = f(X'), \quad (28)$$

где:

$X' \subset X$ – вектор размерности ≤ 3 ,
 $f(X')$ – нелинейная функция не более чем трех любых составляющих вектора X .

Учитывая выражения (26 – 28), математическая модель алгоритма управления каждым ИО с учетом сигнала обратной связи по положению соответствующего ИО имеет вид:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma_{ij}^L + \sigma_{ij}^N - k_{ij}^\delta \delta_{ij}. \quad (29)$$

исследования СУД в разрезе ее алгоритмической структуры и параметров, не касаясь вопросов их конструктивной реализации.

Эффективность выбранных алгоритмов и качество функционирования СУД в целом определяется степенью ее влияния на динамику судна в целом и оценивается с помощью элементов множества показателей СПК, которые ограничиваются составом установленных на судне датчиков информации, параметрами ЭГП и эффективностью соответствующих ИО [1].

Анализ целей и опыта проектирования СУД СПК показывает, что в них используются, как правило, линейные алгоритмы управления. Нелинейные зависимости используются лишь в отдельных случаях.

С учетом этого, в математической модели СУД предусмотрена возможность задания алгоритмов стабилизации и управления, включающих:

- постоянный управляющий сигнал на привод, обеспечивающий перекадку соответствующего ИО на заданный угол:

$$\sigma_{ij}^0 = const, \quad (26)$$

- линейные алгоритмы с постоянными коэффициентами вида:

$$\sigma_{ij}^L = K_{ij} X^T, \quad (27)$$

где: σ_{ij}^L – линейная составляющая управляющего сигнала на входе привода j-го ИО, расположенного на i-ом КУ,

$K_{ij} = \left\| k_{ij}^1 \dots k_{ij}^{21} \right\|$ – вектор постоянных коэффициентов – параметров алгоритмов управления,

Такая модель алгоритмической структуры вида (29) предоставляет исследователю или проектанту возможность формирования алгоритмов различного вида.

5. Модели датчиков информации

Датчики информации $\Sigma_{ди}$, как элементы сложной системы (17), предназначены для измерения динамических параметров движения судна и выдачи входных сигналов в СУД для формирования алгоритмов управления ИО и представления информации судоводителю.

В качестве датчиков информации на СПК могут использоваться датчики следующих типов:

- гирокомпас,
- гировертикали,
- датчики угловых скоростей,
- измерители высоты над поверхностью воды,

- датчики вертикальных и боковых скоростей и ускорений,
- измерители погружения крыльев,
- лаг.

Сигналы с указанных датчиков формируют вектор X^T [1]:

$$X^T = \left\| \Delta\eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}, \dot{\eta}_H, \ddot{\eta}_H, \dot{\eta}_K, \ddot{\eta}_K, \Delta h_H, \Delta h_{cp}, \Delta h_K, \Delta\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}, \Delta\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \ddot{z}, \ddot{V} \right\|.$$

Если какой-то вид датчиков не установлен на конкретном судне, необходимая информация может быть получена путем соответствующих преобразований с имеющихся датчиков.

6. Линеаризованная модель динамики движения судна на подводных крыльях

При решении некоторых задач, связанных с проектированием СПК и его технических систем, особенно для получения оценочных значений фазовых координат судна на начальных этапах проектирования или решения специальных задач, (например, для задач синтеза оптимальных алгоритмов СУД), целесообразно воспользоваться линеаризованной системой дифференциальных уравнений объекта. Это дает возможность оценить такие важные характеристики системы, как устойчивость и управляемость, а также аналитически определить структуру и параметры системы управления. Полученная таким образом структура системы управления может быть принята за исходную и подвергнута дальнейшей оптимизации и доработке с учетом реальных нелинейных характеристик объекта и возмущений, действующих на СПК.

Опыт показывает, что для СПК с глубокопогруженными крыльями линейная модель динамики адекватна объекту в достаточно широком диапазоне фазовых координат и внешних воздействий. Для судов с пересекающими поверхность воды крыльевыми устройствами указанный диапазон значительно уже. Однако, и для таких судов линеаризация уравнений динамики СПК вполне допустима при отсутствии интенсивных волновых возмущений. При этом в каждом конкретном случае необходимо оценивать диапазон изменения фазовых координат, в котором обеспечивается идентичность принятой линейной и исходной нелинейной моделей. Особенно это относится к уравнениям продольного движения СПК с разбитыми пересекающими элементами.

Предполагается, что линеаризация проводится в статическом режиме при движении судна с постоянной скоростью в рамках следующих допущений:

- $V_x = const; \Delta V_x = 0;$
- $\Delta V_y, \Delta V_z, \Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ - малы;
- $V_{z0} = 0;$
- $\omega_{x0} = \omega_{y0} = \omega_{z0} = 0.$

После линеаризации уравнения СПК разделяются на изолированные уравнения продольного и бокового движения, которые соответственно имеют вид:

- продольное движение

$$\dot{\eta} = \varpi_{11}\eta + \varpi_{12}\dot{\eta} + \varpi_{13}\psi + \varpi_{14}\dot{\psi} + \sum_j d_{1j}\delta_j, \quad (30)$$

$$\ddot{\psi} = \varpi_{21}\eta + \varpi_{22}\dot{\eta} + \varpi_{23}\psi + \varpi_{24}\dot{\psi} + \sum_j d_{2j}\delta_j.$$

- боковое движение

$$\ddot{\theta} = \varpi_{31}\theta + \varpi_{32}\dot{\theta} + \varpi_{33}\phi + \varpi_{34}\dot{\phi} + \varpi_{35}\beta + \sum_j d_{3j}\delta_j$$

$$\ddot{\phi} = \varpi_{41}\theta + \varpi_{42}\dot{\theta} + \varpi_{43}\phi + \varpi_{44}\dot{\phi} + \varpi_{45}\beta + \sum_j d_{4j}\delta_j \quad (31)$$

$$\ddot{\beta} = \varpi_{51}\theta + \varpi_{52}\dot{\theta} + \varpi_{53}\phi + \varpi_{54}\dot{\phi} + \varpi_{55}\beta + \sum_j d_{5j}\delta_j$$

где:

ϖ_{ir} – коэффициенты однородной системы уравнений (для продольного движения $i = 1, 2; r = 1, \dots, 4$, а для бокового $i = 1, 2, 3; r = 1, \dots, 5$);

d_{ij} – коэффициенты, характеризующие эффективность j -го исполнительного органа по i -ой координате;

δ_j – угол отклонения j -го исполнительного органа, причем считается, что в продольном движении участвуют только закрылки, а в боковом – закрылки и рули направления.

Процедура линеаризации проводится следующим образом. Пользователем определяются и задаются исходные статические значения фазовых координат, относительно которых проводится линеаризация. К статическому значению каждой фазовой координаты поочередно прибавляется стандартное возмущающее приращение. Измеряются полученные при этом величины параметров $\dot{\eta}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{V}_z$ в исходной нелинейной системе уравнений (6).

Коэффициенты линеаризации ϖ_{ir} и d_{ij} вычисляются как отношения измеренных вариаций ускорения к величине стандартного приращения по r -ой координате или j -ому исполнительному органу:

– для уравнений (30) продольного движения по выражениям (32):

$$\varpi_{11} = \frac{\Delta\dot{\eta}}{\Delta\eta} \quad \varpi_{21} = \frac{\Delta\ddot{\psi}}{\Delta\eta},$$

$$\text{при } \dot{\eta} = \psi = \dot{\psi} = 0 \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1, \dots, 6);$$

$$\varpi_{12} = \frac{\Delta \dot{\eta}}{\Delta \dot{\eta}} \quad \varpi_{22} = \frac{\Delta \ddot{\psi}}{\Delta \dot{\eta}},$$

при $\eta = \psi = \dot{\psi} = 0 \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1, \dots, 6);$
(32)

$$\varpi_{13} = \frac{\Delta \dot{\eta}}{\Delta \dot{\psi}} \quad \varpi_{23} = \frac{\Delta \ddot{\psi}}{\Delta \dot{\psi}},$$

при $\eta = \dot{\eta} = \dot{\psi} = 0 \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1, \dots, 6);$

$$\varpi_{14} = \frac{\Delta \dot{\eta}}{\Delta \ddot{\psi}} \quad \varpi_{24} = \frac{\Delta \ddot{\psi}}{\Delta \ddot{\psi}},$$

при $\eta = \dot{\eta} = \dot{\psi} = 0 \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1, \dots, 6);$

$$d_{1i} = \frac{\Delta \dot{\eta}}{\Delta \delta_i} \quad d_{2i} = \frac{\Delta \ddot{\psi}}{\Delta \delta_i},$$

при $\dot{\eta} = \dot{\eta} = \dot{\psi} = 0 \quad \delta_j = 0 \quad (i \neq j);$

– для уравнений (31) бокового движения по выражениям (33):

$$\varpi_{31} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \theta} \quad \varpi_{41} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \theta} \quad \varpi_{51} = \frac{\Delta \dot{V}_z \rho}{\Delta \theta V},$$

при $\dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1 \dots 6);$

$$\varpi_{32} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \dot{\theta}} \quad \varpi_{42} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \dot{\theta}} \quad \varpi_{52} = \frac{\Delta \dot{V}_z \rho}{\Delta \dot{\theta} V},$$

при $\theta = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1 \dots 6)$

(33)

$$\varpi_{33} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \phi} \quad \varpi_{43} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \phi} \quad \varpi_{53} = \frac{\Delta \dot{V}_z \rho}{\Delta \phi V},$$

при $\theta = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1 \dots 6);$

$$\varpi_{34} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \dot{\phi}} \quad \varpi_{44} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \dot{\phi}} \quad \varpi_{54} = \frac{\Delta \dot{V}_z \rho}{\Delta \dot{\phi} V},$$

при $\theta = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1 \dots 6);$

$$\varpi_{35} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \beta} \quad \varpi_{45} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \beta} \quad \varpi_{55} = \frac{\Delta \dot{V}_z}{\Delta \beta},$$

при $\theta = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (j = 1 \dots 6);$

$$d_{3j} = \frac{\Delta \ddot{\theta}}{\Delta \delta_i} \quad d_{4j} = \frac{\Delta \ddot{\phi}}{\Delta \delta_i} \quad d_{5j} = \frac{\Delta \dot{V}_{zj} \rho}{\Delta \delta_i V},$$

при $\theta = \dot{\theta} = \dot{\phi} = \dot{\beta} = 0, \quad \delta_j = 0 \quad (i \neq j).$

Чтобы определить стабильность коэффициентов линеаризации в симметричной, относительно статического режима, окрестности фазового пространства, они вычисляются дважды: один раз – для положительных приращений фазовых координат, другой раз – для отрицательных. Если полученные при этом значения коэффициентов по какой-либо фазовой координате существенно отличаются друг от друга, то линеаризацию по этой координате нельзя признать допустимой. Если же различие в коэффициентах незначительно, можно

определить их значения как среднее арифметическое соответствующих коэффициентов, полученных для положительных и отрицательных приращений фазовых координат.

Заключение

Определена структура единой среды моделирования, состоящая из трёх блоков: блок, где задаются или формируются значения исследуемых параметров, влияющие на выходные показатели судна, как объекта моделирования; блок представляющий собой ядро единой среды моделирования и блок, где формируется совокупность тех или иных показателей, подлежащих анализу.

Определена математическая модель динамики возмущенного движения СПК, при этом использованы следующие системы координат: земная прямоугольная горизонтальная правая, связанная с судном прямоугольная правая и вспомогательная нецентральная прямоугольная правая. При этом применение вспомогательной системы обусловлено тем, что в ней определяются гидродинамические характеристики каждого из крыльевых устройств.

Обоснованы с точки зрения проектанта СПК основные допущения математической модели. Представлены пространственные уравнения динамики судна на подводных крыльях в общем виде и определены силы и моменты, действующие на судно на подводных крыльях в крыльевом режиме движения. Гидродинамические силы и моменты, возникающие на каждом из крыльевых устройств, определены расчетным путем. Результирующие гидродинамические сила и момент рассматриваются как сумма соответствующих сил и моментов, возникающих на каждом из крыльевых устройств и зависящих от аргументов, характеризующих положение этого крыльевого устройства относительно поверхности воды и местных скосов потока.

Работа двигателей моделируется заданием среднего упора, направленного по оси вала двигателя и параллельного диаметральной плоскости судна. Кроме того в модели динамики предусмотрена возможность задания аэродинамических сил и моментов, действующие на СПК в крыльевом режиме.

Разработана математическая модель электрогидравлического привода, состоящая из суммирующего устройства, электрогидроусилителя и силового интегрирующего привода, охваченных общей обратной связью по положению и скорости перемещения в виде необходимом для исследования системы управления движением.

Разработана модель системы управления движением, которая является одной из важнейших подсистем СПК формирующей алгоритмы управления, поступающие на входы электрогидроприводов соответствующих исполнительных органов, расположенных на несущих поверхностях крыльевых устройств. Реализуемая в данной статье математическая модель системы управления движением предназначена для решения задач исследования её алгоритмической структуры и параметров, не касаясь вопросов их конструктивной реализации.

При решении некоторых задач, связанных с проектированием СПК и его технических систем, особенно для получения оценочных значений

фазовых координат судна на начальных этапах проектирования или решения специальных задач, разработана линеаризованная система дифференциальных уравнений СПК. Это дает возможность оценить такие важные характеристики системы, как устойчивость и управляемость, а также аналитически определить структуру и параметры

системы управления. Полученная таким образом структура системы управления может быть принята за исходную и подвергнута дальнейшей оптимизации и доработке с учетом реальных нелинейных характеристик СПК и возмущений, действующих на него.

Литература

1. Скороходов Д.А. Основные принципы системных исследований судна на подводных крыльях. (С.Д.А.Скороходов, А.Л.Стариченков, Ю.Е.Крылов) // Морские интеллектуальные технологии, №1(51), Т.1, 2021. Стр..
2. А.Н.Лордкипанидзе. Поверочный расчет подводного крыла произвольной геометрии. Метод решения задачи и алгоритм программы. // Морской регистр России, НПП «Форма. С-Петербург, 1993.
3. Скороходов Д.А. Метод оценки конструктивной безопасности судов на подводных крыльях. (Д.А.Скороходов, А.Л. Стариченков, С.Н. Турусов) // Морские интеллектуальные технологии, №3(36), Т.3, 2017. Стр.48-53.
4. Скороходов Д.А. Интеллектуальные технологии для обеспечения безопасности судоходства. (Борисова Л.Ф., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л.) // «Транспорт Российской Федерации», №1 (26), 2010. С. 32-35. Журнал ВАК РФ
5. Скороходов Д.А. Направление информационных технологий для повышения безопасности транспортных комплексов. (Белый О.В., Гурков Р.М., Стариченков) // Транспорт Российской Федерации, №5 (18), 2008. С. 22-24. Журнал ВАК РФ.
6. Скороходов Д.А. Принципы и категории обеспечения безопасности мореплавания. (Борисова Л.Ф., Борисов З.Д., Скороходов Д.А.) // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т.13. №4-1. С.719-729. Журнал ВАК РФ.
7. Скороходов Д.А. Нормирование показателей безопасности мореплавания и рисков потерь. (Борисова Л.Ф., Борисов З.Д., Скороходов Д.А.) // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т.13. №4-2. С.868-876. Журнал ВАК РФ.

References

1. Skorokhodov D.A. Osnovnyye printsipy sistemnykh issledovaniy sudna na podvodnykh kryl'yakh. [Basic principles of hydrofoil system research] (S.D.A.Skorokhodov, A.L.Starichenkov, YU.Ye.Krylov) // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, №1(51), T.1, 2021. Str..
2. A.N.Lordkipanidze. Poverochnyy raschet podvodnogo kryla proizvol'noy geometrii. Metod resheniya zadachi i algoritm programmy. [Verification calculation of a hydrofoil of arbitrary geometry. Method for solving the problem and program algorithm] // Morskoy registr Rossii, NPP «Forma. S-Peterburg, 1993.
3. Skorokhodov D.A. Metod otsenki konstruktivnoy bezopasnosti sudov na podvodnykh kryl'yakh. [Method for assessing the structural safety of hydrofoils] (D.A.Skorokhodov, A.L. Starichenkov, S.N. Turusov) // Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, №3(36), T.3, 2017. Str.48-53.
4. Skorokhodov D.A. Intellektual'nyye tekhnologii dlya obespecheniya bezopasnosti sudokhodstva. [Intelligent technologies for safe navigation] (Borisova L.F., Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L.) // «Transport Rossiyskoy Federatsii», №1 (26), 2010. S. 32-35. Zhurnal VAK RF
5. Skorokhodov D.A. Napravleniye informatsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya bezopasnosti transportnykh kompleksov. [The direction of information technology to improve the safety of transport complexes] (Bely O.V., Gurkov R.M., Starichenkov) // Transport Rossiyskoy Federatsii, №5 (18), 2008. S. 22-24. Zhurnal VAK RF.
6. Skorokhodov D.A. Printsipy i kategorii obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya. [The principles and categories of ensuring the safety of navigation] (Borisova L.F., Borisov Z.D., Skorokhodov D.A.) // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. T.13. №4-1. S.719-729. Zhurnal VAK RF.
7. Skorokhodov D.A. Normirovaniye pokazateley bezopasnosti moreplavaniya i riskov poter'. [Standardization of indicators of safety of navigation and risks of losses] (Borisova L.F., Borisov Z.D., Skorokhodov D.A.) // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. T.13. №4-2. S.868-876. Zhurnal VAK RF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Алексеевич Скороходов, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13; профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: skorohodda@mail.ru

Dmitriy A. Skorokhodov, professor, Dr.Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: skorohodda@mail.ru

Юрий Евгеньевич Крылов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru.

Алексей Леонидович Стариченков, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: alstar72@yandex.ru

Yuriy E. Krylov, PhD (Eng), senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: krylov_yuriy@mail.ru.

Alexey L. Starichenkov, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: alstar72@yandex.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

Человек как кибернетическая система

А.А. Исаев¹ e-mail: isaevalex@list.ru

¹Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Аннотация. Предложены авторские трактовки понятий «человек» (как высокоразвитая кибернетическая система (биоробот), которая функционирует на основании определенных программ (врожденных и сформированных в процессе жизни), «кибернетическая антропология» (как наука, рассматривающая человека как компьютеризированную систему управления, которая функционирует на основании определенных программ), «психопрограммистика» (как отрасль кибернетической антропологии, изучающая врожденные программы человека, которые определяют мышление и поведение последнего). Раскрывается структура человека как биоробота, основными элементами которой являются: 1) Органическая машина (объект управления); 2) Управляющий орган (субъект управления); 3) Устройство «прямой связи»; 4) Устройство «обратной связи». Выявляются основные элементы Управляющего органа человека как биоробота: 1) Совершенный компьютер; 2) Персональный компьютер; 3) Сенсор (Душа). Предложены авторские трактовки понятий «чувства» и «эмоции» с позиции кибернетической антропологии. Раскрываются основные элементы программ, которые лежат в основе безусловных и условных рефлексов.

Ключевые слова: человек, кибернетическая антропология, психопрограммистика, чувства, эмоции, рефлексы человека.

Human as the cybernetic system

Alexander A. Isaev¹ e-mail: isaevalex@list.ru

¹Vladivostok state university of economics and service

Abstract. The author's interpretations of the concepts of "human" are proposed as a highly developed cybernetic system (biorobot), which functions on the basis of certain programs (innate and formed in the process of life); "Cybernetic anthropology" as a science that considers a person as a computerized control system that functions on the basis of certain programs, as well as "psychoprogramming" as a branch of cybernetic anthropology, which studies the innate programs of a person that determine the thinking and behavior of the latter. The structure of a person as a biorobot is revealed, the main elements of which are: 1) Organic machine (control object); 2) Managing body (subject of management); 3) "Direct communication" device; 4) Device "feedback". The main elements of the Managing body of a person as a biorobot are revealed: 1) Perfect computer; 2) Personal computer; 3) Sensor (Soul). The author's interpretations of the concepts of "feelings" and "emotions" from the standpoint of cybernetic anthropology are proposed. The main elements of programs underlying unconditioned and conditioned reflexes are revealed.

Key words: human, cybernetic anthropology, psyoprogrammistics, feelings, emotions, human reflexes.

Введение

Сегодня среди ученых и специалистов отсутствует единый взгляд на такое понятие как «человек». Одной из основных причин сложившейся ситуации является игнорирование большинством антропологов такой научной отрасли как *кибернетическая антропология* (киберантропология). Согласно кибернетической антропологии, «Человек» – это высокоразвитая кибернетическая система (биоробот), которая функционирует на основании определенных программ (как врожденных, так и сформированных в процессе жизни) [2;3]. У истоков кибернетической антропологии стоял «отец кибернетики» Н. Винер, автор известной работы «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине» [10]. О программах человека писал и Дж. Лилли в известной работе «Программирование и метапрограммирование в человеческом биокомпьютере. Теория и эксперименты» [8]. В свою очередь одной из отраслей кибернетической антропологии является *психопрограммистика* – наука, изучающая врожденные программы «Человека», определяющие его мышление и поведение [3].

Целью настоящей статьи является получение ответов на вопросы: 1) из каких элементов состоит система управления «Человек»; 2) что представляют

собой объект и субъект управления системы «Человек»; 3) какова структура элементарных программ человека; 4) какую роль в жизни человека играют основные психические реакции (чувства, эмоции)?

1. Система управления «Человек»

В первом приближении человек – это компьютеризированная система управления, которая состоит из четырех органов (рис. 1):

- 1) *Органическая машина* (объект управления);
- 2) *Управляющий орган* (субъект управления);
- 3) *Устройство «прямой связи»;*
- 4) *Устройство «обратной связи».*

Целью функционирования системы управления «Человек» является удовлетворение различных потребностей (соматических или ментальных). При этом под «потребностью» понимается нехватка так называемых «необходимых объектов потребления» в данной ситуации. Причем характер необходимых объектов потребления, а также их оптимальный объем определяются соответствующими программами человека (врожденными или приобретенными). *Управляющий орган* системы управления «Человек» напоминает сеть взаимосвязанных компьютеров, каждый из которых дает определенную команду соответствующему органу (в частности, *Органической машине*). Причем

местонахождение такой сети компьютеров кибернетическая антропология не уточняет.

В основе функционирования *Управляющего органа* лежит определенная «библиотека программ». Причем каждая из элементарных программ *Управляющего органа* включает два «привязанных друг к другу» элемента: 1) сведения (например, сведения о состоянии материала *Органической машины*) и 2) команда (например, команда, как *Органическая машина* должна вести себя в данной ситуации).

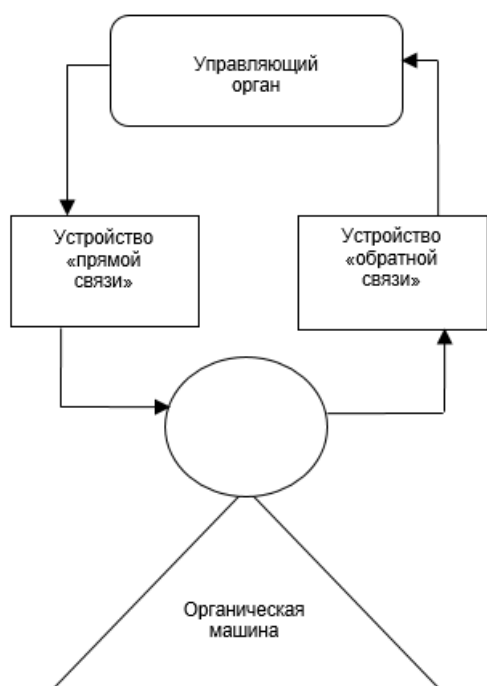


Рис. 1. Общая структура системы управления «Человек»

Принцип функционирования *Управляющего органа* следующий. Сначала на основании комплекса сведений о том, что происходит с материалом *Органической машины*, какие объекты ее окружают, *Управляющий орган* ищет в «библиотеке программ» соответствующую элементарную программу и выявляет связанную с такой программой команду, а затем посылает такую команду соответствующему органу.

Непосредственным получателем команд *Управляющего органа* является *Устройство «прямой связи»*, которое непосредственно приводит в движение *Органическую машину*.

Устройство «обратной связи» информирует *Управляющий орган*, прежде всего о том, что происходит с материалом *Органической машины*, а также с какими объектами внешней среды *Органическая машина* контактирует в данный момент.

Основная цель *Устройства «обратной связи»* состоит в том, чтобы подвергнуть коррекции неоптимальное поведение *Органической машины*. (В силу «свободы воли» в ряде режимов поведение *Органической машины* может быть неправильным.) Например, выполнение команды «ищи пищу» может привести *Органическую машину* в западню. В такой ситуации *Управляющий орган*, используя

рациональное мышление, отказывается от старой команды и дает новую, корректирующую поведение *Органической машины*.

Принцип управления *Органической машиной* можно продемонстрировать на примере рефлекса отдергивания руки при случайном поднесении ее к огню. Согласно кибернетической антропологии, поднесение руки человека к огню всегда является следствием определенной команды. Случайное поднесение руки к огню является следствием неправильной команды «перемещай руку в данном направлении». В таких случаях программы *Управляющего органа* предусматривают отказ от первой команды и подачи второй команды: «убирай руку от огня», которая и ведет к отдергиванию руки от огня.

Материальными носителями информации о состоянии материала *Органической машины* и тех объектах, которые окружают последнюю, являются гипотетические микрочастицы – *биокванты* [1]. Причем каждый биоквант является материальным носителем минимальной порции определенной информации (визуальной, звуковой, вкусовой и т.д.). Например, когда человек смотрит на дерево, то возникающий в его сознании образ дерева, есть не что иное, как реакция *Управляющего органа* на определенные биокванты. В этой связи, если *Управляющий орган* принимает биокванты, связанные в его программном обеспечении с образом дуба, то увидеть березу человек не сможет изначально. Причем особенность человека такова, что большая часть его биоквантов является недоступной для его сознания. В частности, абсолютно недоступной для сознания человека является вся информация, связанная с его внутриклеточной деятельностью.

Взаимодействие биоквантов в пространстве подчиняется определенным физическим законам, прежде всего, закону образования «семьи» биоквантов и закону распада «семьи» биоквантов [5]. В частности, эти законы объясняют такие психические феномены как возникновение ассоциаций и забывание информации.

2. Структура Управляющего органа

В первом приближении *Управляющий орган* состоит из трех элементов: 1) *Совершенный компьютер*; 2) *Персональный компьютер*; 3) *Сенсор (Душа)* (рис. 2). *Совершенный компьютер* – это элемент *Управляющего органа*, который хранит наиболее полную информацию о бесчисленном множестве объектов во Вселенной (включая ментальные системы).

В свою очередь *Совершенный компьютер* является непосредственным приемником сигналов *Устройства «обратной связи»*, несущих информацию о том, что происходит (или не происходит) с *Органической машиной*. Например, одна из основных программ *Совершенного компьютера* обеспечивает недопустимость разрушения материала *Органической машины* и включает определенную команду, нацеленную на защиту материала *Органической машины* от разрушения. В частности, при поднесении руки к огню такой командой является: «убирай руку от огня».

Особенность системы «Человек» состоит в том, что непосредственно адресованные *Органической*

машине команды дает не *Совершенный компьютер*, а еще один компьютер – *Персональный компьютер*. Речь идет о компьютере, который является менее развитым в сравнении с *Совершенным компьютером*. В частности, участие в работе *Управляющего органа* такого элемента как *Персональный компьютер* ведет к тому, что *Органическая машина* допускает ошибки на пути удовлетворения различных потребностей.

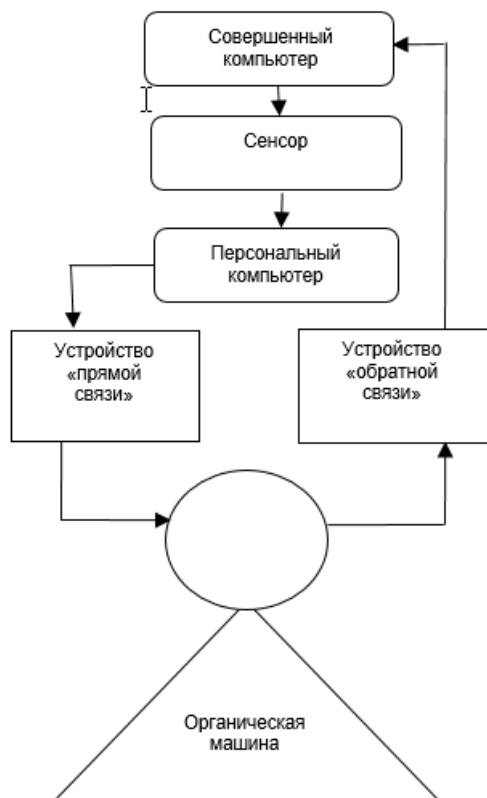


Рис. 2. Детализированная структура системы управления «Человек»

Функционирование *Персонального компьютера* связано с двумя типами мышления: рациональное и иррациональное. Основная задача человека в контексте удовлетворения различных потребностей состоит в том, чтобы максимально приблизить *Персональный компьютер* по уровню развития к *Совершенному компьютеру*.

В свою очередь *Совершенный компьютер* является субъектом управления по отношению к *Сенсору*, а сам *Сенсор* – субъектом управления по отношению к *Персональному компьютеру*.

Сенсор (Душа) – это чувствительный орган, который непосредственно видит, слышит, думает, радуется, страдает и т.д. Основная цель *Сенсора* – продемонстрировать соответствующие психические реакции, которые говорят о правильном (или неправильном) мышлении или поведении человека на пути удовлетворения различных потребностей. Прежде всего, речь идет о таких психических реакциях *Сенсора*, как *чувства и эмоции*.

Таким образом, развивая *Персональный компьютер*, приближая его к *Совершенному компьютеру*, человек тем самым улучшает свое

чувственно-эмоциональное состояние, которое является основным показателем качества его жизни.

3. Психические реакции Сенсора

Кибернетическая антропология различает два вида основных психических реакций *Сенсора*: *чувства и эмоции*.

Чувства – это реакции *Сенсора* на информацию о том, что происходит с материалом *Органической машины*. Согласно программам человека, разрушение материала *Органической машины* недопустимо. В этой связи чувства делятся на две группы: положительные и отрицательные. То есть на чувства, которые говорят о нормальном состоянии материала *Органической машины* (чувства отсутствия физической боли) и чувства, которые говорят о ненормальном состоянии материала *Органической машины* (чувства физической боли).

Следует учитывать, что *Органическая машина* человека находится в постоянном взаимодействии с другими объектами внешней среды. В этой связи определенное чувство является следствием правильной (или неправильной) команды *Персонального компьютера* в контексте удовлетворения соответствующей потребности. Например, когда вместо правильной команды «Убегай», *Персональный компьютер* дает неправильную команду «Бей», которая ведет к повреждению материала *Органической машины* и возникновению чувства физической боли.

Таким образом, чувства являются индикаторами, «подсказками», которые позволяют определить, насколько правильной (или неправильной) была команда *Персонального компьютера* в данной ситуации. Кстати, еще в «Аналитической психологии» К.Г. Юнг рассказывал об ученых, которые утверждали, что чувство – это «незаконченная», «ущербная», «хромая» мысль [9].

Причем хотелось бы подчеркнуть, что неправильная команда *Персонального компьютера* – это, как правило, результат конфликта между рациональным и иррациональным мышлением.

Эмоции – это реакции *Сенсора* на степень удовлетворения комплекса потребностей данного индивида. В отличие от *чувств*, *эмоции* имеют более «размытый», ассоциативный характер. Недаром *эмоции* называются «разбавленными чувствами».

Как и чувства, эмоции могут быть, как позитивными, так и негативными. Позитивные эмоции – это результат высокой степени удовлетворения данного комплекса потребностей, а негативные эмоции – результат низкой степени удовлетворения данного комплекса потребностей. Особенность человека такова, что он совершает определенные действия лишь тогда, когда они приведут к более полному удовлетворению соответствующих потребностей в сравнении с альтернативными действиями [3;4]. В этой связи эмоции являются мотиваторами (или демотиваторами) деятельности человека. Кстати, о том, что эмоции следует рассматривать, как «мотивационную систему» писал К. Изард в «Эмоциях человека» [7].

4. Условные и безусловные рефлексy

Классическая физиология трактует рефлекс (от лат. reflexus – отраженный) как опосредованная

нервной системой быстрая реакция организма на раздражитель. Согласно кибернетической антропологии, рефлексy связаны с определенными программами (постоянными или временными).

По такому признаку как «продолжительность жизни рефлекса», рефлексy делятся на две группы: А) безусловные (постоянные) и Б) условные (временные).

А) Безусловные рефлексy.

Безусловные рефлексy связаны с программой, состоящей из следующих элементов:

- 1) элемент *Органической машины*;
- 2) объект внешней среды;
- 3) характер взаимодействия элемента *Органической машины* с данным объектом внешней среды;
- 4) характер чувства;
- 5) команда, адресованная соответствующему элементу *Органической машины*.

Примером безусловного рефлекса является рефлекс, возникающий при поднесении руки к огню. Наличие четырех данных («Рука», «Огонь», «Контакт руки с огнем», «Боль») ведет к выбору *Управляющим органом* команды «Убирай руку от огня».

Б) Условные рефлексy.

Условные рефлексy связаны с программой, состоящей из следующих элементов:

- 1) элемент *Органической машины*;
- 2) объект внешней среды;
- 3) характер многократно повторяющегося целенаправленного взаимодействия элемента

Органической машины с данным объектом внешней среды;

4) команда, адресованная соответствующему элементу *Органической машины*.

Примером условного рефлекса является непроизвольное протягивание руки при включении света к правой стене, где длительное время находился выключатель, в то время, как не так давно выключатель был перенесен на левую стену. Наличие четырех данных («Рука», «Правая стена», «Контакт руки с правой стеной», «Отсутствие боли») ведет к выбору *Управляющим органом* команды «Протягивай руку к правой стене».

Заключение

Кибернетическая антропология (одной из отраслей которой является психопрограммистика) – научный фундамент, позволяющий решать широкий спектр проблем, связанных с созданием антропоморфных роботов (андроидов) нового поколения, «новых андроидов». В частности, речь идет о создании андроидов, которые не только обладают высоким интеллектом, но и способны максимально достоверно имитировать чувственно-эмоциональные реакции человека в различных ситуациях. Причем в первую очередь речь идет об «экранных» андроидах (т.е. андроидах, которые демонстрируются на экране монитора). По мнению автора, создание «новых андроидов» особенно актуально в эпоху «расчеловечивания» людей, потери желания общаться с другими людьми, а также недоверия ко многим «публичным личностям».

Литература

1. Исаев А.А. Биоквантовая психология. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2013. 108 с.
2. Исаев А.А. Психология биоробота. М.- Берлин: Директ-Медиа, 2014. 86 с.
3. Исаев А.А. Психопрограммистика. М.- Берлин: Директ-Медиа, 2019. 62 с.
4. Исаев А.А. Ощущения, чувства, эмоции: кибернетический аспект //Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. 2016. № 2. С.173-179.
5. Исаев А.А. Формирование безусловных рефлексов андроида на основе биоквантовой психологии //Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. 2014. № 3. С. 177-183.
6. Симонов П.В. Что такое эмоция? М.: Наука, 1966. 94 с.
7. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.
8. Lilly J.C. Programming and Metaprogramming in the Human Biocomputer. Theory and Experiments. New York, Julian Press, 1967. 160 p.
9. Junge C.G. Analytical psychology: Its Theory and Practice. The Tavistock Lectures. London a. Henley, 1968.
10. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. New-York, Wiley and Sons, Inc. Paris: Hermann et cie, 1948.194 p.

References

1. Isaev A.A. Biokvantovaya psikhologiya [Bioquantum psychology]. Vladivostok: Izd-vo VGUES, 2013. 108 s.
2. Isaev A.A. Psikhologiya biorobota [Psychology of biorobot]. Moscow- Berlin: Direct-Media, 2014. 86 s.
3. Isaev A.A. Psikhoprogrammistika [Psyprogrammistics]. Moscow- Berlin: Direct-Media, 2019. 62 s.
4. Isaev A.A. Oshusheniya, chuvstva, emotsii: kiberneticheskiy aspekt [Sensations, senses, emotions: cybernetic aspect]. Territory of new opportunities. Herald of the Vladivostok State University of Economics and Service. 2016. №2. S.173-179.
5. Isaev A.A. Formirovanie bezuslovnikh refleksov androida na osnove biokvantovoy psikhologii [Formation of unconditioned android reflexes based on bioquantum psychology]. Territory of new opportunities. Herald of the Vladivostok State University of Economics and Service. 2014. № 3. S. 177-183.
6. Simonov P.V. Chto est emotsiya? [What is emotion?]. Moscow: Nauka, 1966. 94 s.
7. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.
8. Lilly J.C. Programming and Metaprogramming in the Human Biocomputer. Theory and Experiments. New York, Julian Press, 1967. 160 p.
9. Junge C.G. Analytical psychology: Its Theory and Practice. The Tavistock Lectures. London a. Henley, 1968.
10. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. New-York, Wiley and Sons, Inc. Paris: Hermann et cie, 1948.194 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Александр Аркадьевич Исаев, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: isaevalex@list.ru

Alexander A. Isaev, Dr.Sci. (Econ), Ph.D. (Eng.), Professor of the Department of international marketing and trades, Vladivostok state university of economics and service, Gogolya, 41, Vladivostok, 69014, Russian Federation, e-mail: isaevalex@list.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2021

Принята к публикации: 15.05.2021

УДК 62.506.29.519

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.026>

Полипеременные условно-зависимые предикаты в модели представления знаний автономных мобильных интеллектуальных агентов

В.Б. Мелехин¹ e-mail: pashka1602@rambler.ru, М.В. Хачумов^{2,3} e-mail: khmike@inbox.ru

¹Дагестанский государственный технический университет

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской Академии наук,

³Российский университет дружбы народов

Аннотация. Показано, что известные модели представления и обработки знаний не позволяют построить интеллектуальный решатель задач автономных мобильных интеллектуальных агентов, способных выполнять сложные задания в априори неописанных нестабильных условиях проблемной среды. Для решения данной актуальной проблемы в статье предлагаются типовые конструкции модели представления знаний безотносительно к конкретной предметной области, строящиеся на основе полипеременных условно-зависимых предикатов. Приведена структура данного вида предикатов и определены условия, при выполнении которых, в результате означивания входящих в них различного сорта переменных, получаются истинные высказывания, характеризующие необходимые условия для достижения стоящих подцелей и целей поведения в текущей ситуации нестабильной проблемной среды. Разработаны различные по назначению типовые элементы модели представления знаний автономных интеллектуальных агентов, позволяющие формировать на их основе различные по сложности программы целенаправленной деятельности связанные с выполнением сформулированного им задания. Отмечено, что дальнейшее развитие полученных в настоящей работе результатов связано с формализацией мыслительных актов и разработкой инструментальных средств обработки знаний для построения алгоритмов автоматического планирования целенаправленного поведения автономных мобильных интеллектуальных агентов в нестабильных недоопределенных условиях функционирования.

Ключевые слова; интеллектуальный агент, проблемная среда, полипеременный условно-зависимый предикат, планирование поведения, условия неопределенности.

Polyvariable conditionally dependent predicates in the knowledge representation model of autonomous mobile intelligent agents

Vladimir B. Melekhin¹ e-mail: pashka1602@rambler.ru, Mikhail V. Khachumov^{2,3} e-mail: khmike@inbox.ru

¹Dagestan State Technical University, Russian Federation

²Federal Research Center "Computer Sciens and Control" of RAS, Russian Federation

³Peoples' Friendship University of Russia, Russian Federation

Abstract. It is shown that the known models of knowledge representation and processing do not allow constructing an intelligent problem solver for autonomous mobile intelligent agents capable of performing complex tasks in a priori undescribed unstable conditions of a problematic environment. To solve this topical problem, the article proposes standard constructions of a knowledge representation model, without reference to a specific subject area, based on polyvariable conditionally dependent predicates. The structure of this type of predicates is given and the conditions are determined under which, as a result of the valuation of variables included in them, true statements are obtained that characterize the necessary conditions for achieving behavioral sub goals and goals in the current situation of an unstable problematic environment. The standard and different in purpose elements of knowledge representation model for autonomous intelligent agents have been developed, which make it possible to form programs of purposeful activity of different complexity associated with the implementation of the formulated task. It is noted that further development of the results obtained in this work is associated with the formalization of mental acts and the development of knowledge processing tools for constructing automatic planning algorithms of the purposeful behavior of autonomous mobile intelligent agents in unstable underdetermined conditions.

Key words: intelligent agent, problematic environment, polyvariable conditionally dependent predicate, behavior planning, conditions of uncertainty.

Введение

К одному из подходов построения интеллектуальных решателей задач (ИРЗ) автономных мобильных интеллектуальных агентов (АМИА) различного назначения, следует отнести разработку модели представления и обработки знаний, обеспечивающей автоматическое планирование целенаправленного поведения в априори неописанных условиях нестабильной проблемной среды (ПС). Такая необходимость вызвана следующими обстоятельствами, которые сложились в настоящее время в области создания интеллектуальных решателей задач АМИА.

1. Использование для этой цели различных генетических [1] и роевых алгоритмов [2], а также их реализация на основе нейронных сетей [3], позволяет организовать только рефлекторное поведение АМИА в априори неописанных условиях ПС. Однако, одной такой формы целесообразного поведения, в основе которой лежит наглядно-действенное мышление [4], явно недостаточно для наделения АМИА способностью выполнять сложные целевые задания, связанные с необходимостью целенаправленного преобразования различных ситуаций ПС в текущих условиях функционирования.
2. Применение различных логических моделей (см., например, [5 – 7]), которые нашли широкое

распространение в ИРЗ стационарных интеллектуальных систем, для представления и обработки знаний АМИА является ограниченным по следующим основным причинам. С одной стороны, для реализации на их основе процедур планирования поведения требуется высокопроизводительная ЭВМ, т.к. они в общем случае обладают экспоненциальной сложностью вывода [8]. Что же касается бортовых вычислительных систем АМИА, то они, как правило, имеют ограниченные вычислительные ресурсы.

С другой стороны, при приемлемой сложности вывода, организованного в рамках логического подхода [9], требуется построение подробной модели представления знаний, описывающих закономерности преобразования текущих условий ПС. Однако, как показывает опыт разработки ИРЗ для АМИА, построение такой модели закономерностей реальной ПС на практике не представляется возможным [10]. Кроме того, данная необходимость ограничивает использование логических моделей для организации планирования целенаправленного поведения АМИА в условиях неопределенности.

3. Модели представления и обработки знаний, предложенные в [11, 12] в значительной степени позволяют преодолеть проблемы организации интеллектуальных решателей задач АМИА рассмотренные в пп. 1,2. Однако, целенаправленное поведение АМИА в этом случае складывается из следующих друг за другом этапов. На первом этапе формируется план поведения, состоящий из упорядоченной последовательности действий, отработка которых позволяет осуществить требуемые согласно заданной цели преобразования текущей ситуации ПС. Затем на втором этапе АМИА осуществляется непосредственное выполнение сформированного плана поведения.

Однако такая двухэтапная организация целенаправленной деятельности АМИА не позволяет выполнять сложные задания в динамических условиях функционирования. Это обусловлено тем, что в этом случае в процессе планирования поведения может проявиться запаздывание реакций интеллектуальной системы на происходящие в ПС независимые от нее изменения. Следовательно, такая организация интеллектуального решателя задач АМИА, предназначенного для целенаправленной деятельности в динамических проблемных средах с быстрой сменой условий функционирования, является неприемлемой.

В статье рассматривается один из подходов позволяющий обойти отмеченные в пп. 1–3 проблемы построения интеллектуальных решателей задач, обеспечивающий возможность организации целенаправленной деятельности АМИА в динамических проблемных средах. В первой части статьи предлагается модель представления знаний, которая состоит из набора типовых модулей (кирпичиков), на основе которых строится план целенаправленного поведения, обеспечивающий АМИА выполнение различных по сложности заданий в нестабильной ПС. Действия формируемой таким образом программы поведения отрабатываются АМИА на каждом текущем шаге планирования целенаправленной деятельности в реальном

времени в процессе выполнения сформированного ему задания. Формально типовые модули, используемые для автоматического формирования плана поведения, представляют собой полипеременные условно-зависимые предикаты (ПУЗП) или типовые конструкции логической модели представления и обработки знаний интеллектуального решателя задач АМИА.

1. Полипеременные условно-зависимые предикаты как типовые конструкции модели представления знаний

Как отмечено выше, в качестве типовых конструкций модели представления и обработки знаний АМИА безотносительно к конкретной предметной области предлагается использовать полипеременные условно-зависимые предикаты, которые в отличие от условно-зависимых предикатов предложенных в [13], содержат переменные различных сортов. Отсюда, в общем случае понятие «полипеременный условно-зависимый предикат» можно определить следующим образом.

Определение. Под ПУЗП следует понимать выражение $P_{j_1}(S_{j_1}^*, x_{j_2}^*(X_{j_2}^*), y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*))$, которое становится высказыванием при подстановке в него вместо переменных $(S_{j_1}^*, x_{j_2}^*(X_{j_2}^*), y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*))$ их значений, соответственно из множеств:

$$S = \{s_{j_4}\}, j_4 = \overline{1, m_1},$$

$$O = \{o_{j_5}(X_{j_5})\}, j_5 = \overline{1, n_1},$$

$$Y = \{y_{j_6}(Y_{j_6})\}, j_6 = \overline{1, n_2} \text{ и } R = \{r_{j_7}\}, j_7 = \overline{1, n_3}.$$

Здесь: $X_{j_2}^*, Y_{j_3}^*$ – множества характеристик, соответственно определяющих переменные сорта «объекты» $x_{j_2}^*(X_{j_2}^*)$ и «события» $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$,

$$Y^* = \{y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*)\}, j_3 = \overline{1, n_4} \text{ происходящие в ПС;}$$

X_{j_5}, Y_{j_6} – множества характеристик, соответственно определяющих объекты $o_{j_5}(X_{j_5})$ и происходящие в ПС события $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$;

S – множество фрагментов или частей различных допустимых ситуаций ПС;

O – множество объектов проблемной среды;

Y – множество событий, происходящих в ПС независимо от обрабатываемых АМИА действий;

R – множество отношений, которые выполняются в ПС между ее объектами, происходящими в ней событиями и АМИА.

Таким образом, в общем случае ПУЗП могут включать переменные следующих сортов.

$$1. \text{ Комплексные переменные } S^* = \{S_{j_1}^*\}, j_1 = \overline{1, m_2}$$

определяющие условия, при выполнении которых в ПС соответствующие им полипеременные условно-зависимые предикаты, после допустимого

означивания всех входящих в них переменных их значениями с учетом текущих условий функционирования АМИА, обращаются в истинные высказывания. Комплексные переменные $S_{j_1}^* \in S^*$ ПУЗП представляет собой активную нечеткую семантическую сеть (АНСС), которая определяется нечетко помеченным мультиграфом $G_{j_1} = (v_0, V_{j_1}, E_{j_1})$ [14]. Здесь: v_0 – опорная помеченная АМИА вершина, относительно которой выполняется сравнение между собой различных нечетких семантических сетей.

$V_{j_1} = \{v_{i_1}^{j_1}\}, i_1 = \overline{1, n_5}$ – множество вершин сети, которые определяются либо переменными сорта «объекты» $x_{j_2}^*(X_{j_2}^*) \in X$, либо переменными сорта «события» $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$ происходящими в ПС независимо от АМИА;

$E_{j_1} = \{e_{i_2}^{j_1}\}, i_2 = \overline{1, n_6}$ – множество дуг АНСС, помеченных переменными

$r_{j_8}^*(T_{j_8}^k) \in R^*, k = \overline{1, 5}, j_8 = \overline{1, n_7}$ сорта «отношения», определяющими их значения которые должны выполняться в ПС между ее объектами, событиями и АМИА для того, чтобы предикат, содержащий комплексную переменную $S_{j_1}^* \in S^*$ после означивания входящих в нее простых переменных фактическими наблюдаемыми в ПС их значениями, являлся бы истинным высказыванием; $T_{j_7}^k$ – k терм лингвистической переменной [15], определяющей качественные и количественные оценки переменной $r_{j_8}^*(T_{j_8}^k) \in R^*$ сорта «отношения», накладывающий ограничения на фактические ее значения $r_{j_7} \in R$, которые должны по условиям ПУЗП наблюдаться в текущей ситуации ПС.

2. Переменные сорта «объекты»

$X^* = \{x_{j_1}^*(X_{j_1}^*)\}, j_1 = \overline{1, n_1}$, область определения которых представляет собой множество различных объектов ПС $O = \{o_{j_2}(X_{j_2})\}, j_2 = \overline{1, n_2}$, для которых выполняется условие $X_{j_1} \subseteq X_{j_2}$. Иными словами, означивание переменной $x_{j_1}^*(X_{j_1}^*) \in X^*$ в АНСС произвольным объектом ПС $o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$ является допустимым, если для этого объекта справедливо условие $X_{j_1} \subseteq X_{j_2}$, где X_{j_1}, X_{j_2} – соответственно множество характеристик определяющих j_1 объектную переменную и j_2 объект ПС. Следует отметить, что, как правило, для произвольной проблемной среды выполняется условие $n_2 > n_1$.

3. Переменные сорта «события»

$Y^* = \{y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*)\}, j_3 = \overline{1, n_8}$, которые означиваются происходящими в ПС событиями

$Y = \{y_{j_6}(Y_{j_6})\}, j_6 = \overline{1, n_2}$ при выполнении для них следующих условий $Y_{j_3}^* \subseteq Y_{j_6}$.

4. Переменные сорта «отношения» $r_{j_8}^*(T_{j_8}^k) \in R^*$, которые означиваются фактическими значениями $r_{j_7}^{**}$ соответствующих области их значений отношений $r_{j_7} \in R$ наблюдаемыми в ПС, если для них справедливо следующее условие $r_{j_7}^{**} \in [r_{j_8}(k), r_{j_8}(k+1)]$, где $r_{j_8}(k), r_{j_8}(k+1)$ – верхняя и нижняя граница числовых значений термина $T_{j_8}^k$ на шкале лингвистической переменной, описывающей допустимые количественные оценки $r_{j_7}^{**}$ отношений $r_{j_7} \in R$.

Следует отметить, что если дуга $e_{i_2}^{j_1} \in E_{j_1}$ в АНСС

G_{j_1} является инцидентной двум вершинам помеченным переменными сорта «объекты» или двум вершинам, одна из которых определяется переменной сорта «объекты», а вторая – помечена АМИА, то, как правило, она определяется отношением пространства состояний. Это может быть либо допустимое расстояние между объектами находящимися в ПС и АМИА, либо их необходимым расположением относительно друг друга в вертикальной плоскости.

В случае же, когда дуга $e_{i_2}^{j_1} \in E_{j_1}$ инцидентна паре вершин помеченных переменными типа «события» или паре вершин, одна из которых помечена переменной сорта «события», а другая переменной сорта «объекты» или АМИА, то она может определяться:

– отношением, описывающим характер и уровень влияния событий $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$ на состояние соответствующего объекта ПС или поведение АМИА. Например, наблюдается среднее по степени негативного (позитивного) влияния событие на обработку АМИА заданного вида действий над определенными объектами ПС и т.п. Другими словами, появление в ПС определенного вида событий $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$, играет роль либо «тормозных», либо «пусковых» сигналов к определенному виду деятельности АМИА. Следовательно, при возникновении в ПС негативно действующих на поведение АМИА событий, ему требуется либо полностью устранить, либо ослабить их влияние на дальнейшую целенаправленную деятельность;

– отношением, характеризующим причинно-следственные связи между различными событиями ПС. Иначе говоря, ребро помечается отношением, которому соответствуют условия, когда появление в ПС одного события влечет за собой через

определенный промежуток времени проявление в ней другого события, которое, в свою очередь, либо позитивно, либо негативно влияет на определенный вид деятельности АИМА. Например, появление в ПС события типа $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$ через средний промежуток времени влечет за собой проявление в ней события, удовлетворяющего требованиям переменной $y_{j_3}^{**}(Y_{j_3}^{**}) \in Y^*$, которое препятствует перемещению АИМА в заданном направлении и т.п. Таким образом, все переменные входящие в структуру ПУЗП являются связанными, т.е. проведение их произвольного означивания в предикатном выражении не допускается. Отсюда с очевидностью вытекает справедливость следующего утверждения.

Утверждение. Высказывания, получаемые в результате означивания в ПУЗП различного сорта переменных конкретными их значениями, являются истинными тогда и только тогда, когда объекты ПС $o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$, происходящие в проблемной среде

события $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$, а также отношения между ними $r_{j_7} \in R$ удовлетворяют требованиям

биективно соответствующих им переменных $x_{j_1}^*(X_{j_1}^*) \in X^*$, $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$ и $r_{j_8}^*(T_{j_8}^k) \in R^*$, входящих в структуру означиваемой комплексной переменной $S_{j_1}^* \in S^*$ полипеременного условно-

зависимого предиката $P_{j_1}(S_{j_1}^*, x_{j_2}^*(X_{j_2}^*), y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*))$.

Рассмотрим смысловое содержание различных предикатных символов P_{j_1} обеспечивающих возможность построения на их основе соответствующих типовых конструкций модели представления знаний, служащих для автоматического планирования целенаправленного поведения АИМА.

1. Предикаты, у которых смысл предикатных символов P_{j_1} определяется следующим выражением: «для достижения подцели поведения, определяемой комплексной переменной $S_{j_1}^* \in S^*$, отработать упорядоченную последовательность действий B_{j_1} ».

2. Формулы, у которых смысл предикатных символов P_{j_1} определяется следующим образом: «для устранения влияния события ПС $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$, удовлетворяющего требованиям переменной сорта «события» $y_{j_3}^*(Y_{j_3}^*) \in Y^*$, входящей в структуру комплексной переменной $S_{j_1}^* \in S^*$, необходимо отработать упорядоченную последовательность действий B_{j_1} ».

3. Предикаты, определяющие алгоритмы планирования перемещений в ПС, которые выбираются АИМА в зависимости от сложившихся в среде условий функционирования. Предикатный

символ P_{j_1} таких ПУЗП имеет следующее содержание: «использовать алгоритм планирования целенаправленного перемещения $A_{j_8}, j_8 = \overline{1,5}$ при наблюдении в ПС условий, определяемых комплексной переменной $S_{j_1}^*(j_8) \in S^*$ ».

2. Функциональное назначение типовых конструкций модели представления знаний

Рассмотрим АИМА оснащенного техническим зрением и способного обрабатывать множество

различных действий $B = \{b_{j_9}\}, j_9 = \overline{1, n_9}$,

например, движение вперед, поворот влево, вправо, поднять и положить объект в ПС и т.д. Тогда, для построения модели представления знаний безотносительно к конкретной предметной области с учетом допустимого вида событий $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$, которые могут происходить в ПС и влиять на поведение АИМА, предлагается использовать ПУЗП следующих типов.

1. Полипеременные двухместные $P_{j_1}(S_{j_1}^*(j_1), x_2^*(X_2^*))$ и k – местные

$P_{j_1}(S_{j_1}^*(j_1), x_2^*(X_2^*), \dots, x_k^*(X_k^*))$ условно-

зависимые предикаты, определяющие типовые конструкции определенного вида деятельности АИМА, связанной с целенаправленной обработкой действий $b_{j_9} \in B$ над заданными объектами ПС

$o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$. Здесь предикатный символ P_{j_1} –

определяет упорядоченную последовательность действий $\langle b_{j_9}^1, b_{j_9}^2, \dots, b_{j_9}^d \in B \rangle$, которую для

выполнения сформулированного задания может отработать АИМА над объектами ПС $o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$,

удовлетворяющими требованиям переменных $x_2^*(X_2^*), x_3^*(X_3^*), \dots, x_k^*(X_k^*)$ сорта «объекты»;

$S_{j_1}^*(j_1)$ – комплексная переменная, характеризующая условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки

комплекса действий $\langle b_{j_9}^1, b_{j_9}^2, \dots, b_{j_9}^d \in B \rangle$.

2. Двухместные ПУЗП вида $P_{j_1}(S_{j_1}^*(j_1), S_2^*(j_1))$

, где P_{j_1} – предикатный символ, который определяет упорядоченную последовательность действий

$\langle b_{j_9}^1, b_{j_9}^2, \dots, b_{j_9}^d \in B \rangle$, отработка которой в текущих условиях ПС, определяемых комплексной

переменной $S_{j_1}^*(j_1)$, обеспечивает выполнение в ней условий соответствующих комплексной

переменной $S_2^*(j_1)$.

3. Двухместные и многоместные ПЗУП, соответственно вида $P_{j_1}(S_{j_1}^*(j_1), y_2^*(Y_2^*))$ и

$P_{j_1}(S_{j_1}^*(j_1), y_2^*(Y_2^*), \dots, y_k^*(Y_k^*))$, которые позволяют

АМИА определить последовательность действий $\langle b_{j_9}^1, b_{j_9}^2, \dots, b_{j_9}^d \in B \rangle$, обработка которой нейтрализует влияние негативно действующих на его поведение как отдельных $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$, так и комплексов взаимосвязанных между собой $\langle y_{j_6}^1(Y_{j_6}^1), \dots, y_{j_6}^k(Y_{j_6}^k) \in Y \rangle$ событий ПС. Здесь $S_1^*(j_1)$ – комплексная переменная, характеризующая условия, при выполнении которых в ПС может быть нейтрализовано негативное влияние содержащихся в ней событий $y_{j_6}(Y_{j_6}) \in Y$

4. Двухместные полипеременные условно-зависимые предикаты типа $P_{j_1}(S_1^*(j_1), A_2(j_8))$, позволяющие АМИА выбрать один из алгоритмов планирования перемещений $A_2(j_8)$ в ПС с препятствиями в соответствии со сложившимися в ней условиями $S_1^*(j_1)$. В общем случае условия $S_1^*(j_1)$ могут соответствовать следующим основным случаям:

- целевое местоположение находится либо в пределах разрешающей способности технического зрения АМИА и непосредственно им воспринимается в ПС, либо заданы только координаты расположения цели. В данном случае АМИА для планирования своего перемещения использует соответственно алгоритмы планирования поведения $A(1)$ и $A(2)$, например, предложенные в [16]:

- в качестве цели выступает подвижный объект $o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$ воспринимаемый АМИА в ПС и ему требуется найти либо точку встречи с целью, либо точку расхождения в среде с подвижным объектом. В этом случае АМИА для планирования своего перемещения в ПС может использовать, соответственно алгоритмы планирования маршрута движения $A(3)$ и $A(4)$ построенные на основе процедур планирования поведения, рассмотренных в [13];

- координаты местоположения заданного АМИА объекта ПС $o_{j_5}(X_{j_5}) \in O$ ему априори неизвестны. Тогда, для поиска заданного объекта в проблемной среде АМИА может использовать алгоритм планирования поведения на основе инструментальных средств поисково-исследовательской деятельности, предложенных в [17].

5. Типовые конструкции со встроенными предикатами, имеющие, например, следующую структуру:

$$P(j_9 = 1 \downarrow [P_{j_1}^1(S_1^*(j_1), y_2^*(Y_2^*)), \dots, P_{j_1}^d(S_1^*(j_1), S_2^*(j_1))], j_9 = j_9 + 1, (1)$$

$$IF(j_9 < z) \uparrow \text{конец}).$$

Такие конструкции модели представления знаний позволяют АМИА при необходимости организовать циклическую обработку кортежа действий $\langle B_{j_1}^1, \dots, B_{j_1}^d \rangle$, определяемого цепочкой встроенных в них ПУЗП:

$$[P_{j_1}^1(S_1^*(j_1), y_2^*(Y_2^*)), \dots, P_{j_1}^d(S_1^*(j_1), S_2^*(j_1))].$$

Необходимо отметить, что в типовых конструкциях модели представления знаний (1) переменная z определяет количество циклов обработки кортежа действий $\langle B_{j_1}^1, \dots, B_{j_1}^d \rangle$, которое необходимо выполнить АМИА для достижения текущей подцели поведения. Например, при выполнении погрузочных или разгрузочных работ и т.п. Иначе говоря, действия, входящие в кортеж $\langle B_{j_1}^1, \dots, B_{j_1}^d \rangle$, обрабатываются АМИА циклически до тех пор, пока справедливым является выполнение условия $(j_9 < z)$. Значение переменной z , как правило, определяется и устанавливается по содержанию циклически решаемой подзадачи.

Резюмируя вышеизложенное, следует также отметить, что дальнейшее развитие полученных в статье результатов сводится к формализации мыслительных актов и разработке инструментальных средств обработки знаний, связанных с построением алгоритмов планирования целенаправленного поведения АМИА в априори недоопределенных условиях нестабильной проблемной среды.

Заключение

1. Предложенные типовые элементы модели представления знаний, построенные на основе полипеременных условно-зависимых предикатов, позволяют описывать сложные закономерности преобразования ситуаций ПС безотносительно к конкретной предметной области, что наделяет АМИА способностью адаптироваться к условиям неопределенности и на этой основе организовать свою целенаправленную деятельность в априори неопределенных условиях функционирования.

2. Возможность обработки действий выявленных на каждом шаге планирования поведения в реальном времени с учетом происходящих в ПС событий, позволяет АМИА организовать целенаправленную деятельность в нестабильных условиях функционирования в сложных недоопределенных условиях изменяющейся проблемной среды.

3. В общем случае набор типовых элементов модели представления знаний определяется функциональным назначением АМИА и может пополняться по мере накопленного опыта их эксплуатации в различных по сложности априори недоопределенных нестабильных проблемных средах.

Литература

1. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. М.: ДМК Пресс, 2020. 940 с.
2. Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. М.: ЛЕНАНД, 2019. 352 с.
3. Роберт Кальман. Нейронные сети. Краткий справочник. М.: Вильямс, 2017. 288 с.
4. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Формы мышления автономных интеллектуальных агентов: особенности и проблемы их организации // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4. Том. 1. С.223 – 229.
5. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020, 1216 p.
6. Фин В.К. Искусственный интеллект: методология применения и философия. М.:Косанд, URSS, 2018. 448 с.
7. Форд Мартин. Архитектура интеллекта. Вся правда об искусственном интеллекте от создателей. М.: ДМК Пресс, 2018. 311 с.
8. Kilani Y., Bsoul M., Alsarhan A., Al-Khasawneh A. A. Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms. // Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms. 2013. №3. V.5. Pp. 233 – 256.
9. Вагин В.Н., Деревянко А.В., Кутепов В.П. Алгоритмы параллельного логического вывода и исследование их эффективности на компьютерных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. №1. С.3 – 9.
10. Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Каляев И.А. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М: Наука. 1990. 147 с.
11. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Разбиение сложных задач на подзадачи в процессе планирования целенаправленного поведения интегрального беспилотного летательного аппарата в пространстве состояний // Морские интеллектуальные технологии, 2020, № 3. Том 1. С. 237 – 244.
12. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения интегрального беспилотного летательного аппарата на основе разбиения сложных задач на подзадачи в пространстве состояний // Морские интеллектуальные технологии, 2020, № 3. Том 1. С. 245 – 252.
13. Melekhin V.B. Model of Representation and Acquisition of New Knowledge by an Autonomous Intelligent Robot Based on the Logic of Conditionally Dependent Predicates // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. № 58(5). Pp. 747 – 765.
14. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Нечеткие семантические сети как адаптивная модель представления знаний автономных интеллектуальных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 3. С. 61 – 72.
15. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.
16. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование маршрута целенаправленного полета автономного летательного аппарата на низкой высоте в условиях неопределенности // Авиакосмическое приборостроение. 2018. №1. С. 18 – 27.
17. Мелехин В.Б. Алгоритмы автоматического формирования модели окружающей среды транспортным роботом // Кибернетика, 1985. № 4. С. 98 – 102.

References

1. Sajmon D. Algoritmy evolyucionnoj optimizacii [Algorithms for Evolutionary Optimization]. Moscow, DMK Press, 2020, 940 p.
2. Karpov V.E., Karpova I.P., Kulinich A.A. Social'nye soobshchestva robotov [Social communities of robots]. Moscow, LENAND, 2019, 352 p.
3. Robert Kal'man. Nejronnye seti. Kratkij spravochnik [Neural networks. Quick reference]. Moscow, Vil'yams, 2017, 288 p.
4. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Formy myshleniya avtonomnyh intellektual'nyh agentov: osobennosti i problemy ih organizacii [Forms of thinking of autonomous intelligent agents: features and problems of their organization]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine Intellectual Technologies], 2020, 4 (1), pp. 223 – 229.
5. Stuart Russell, Peter Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4 ed. Pearson, 2020, 1216 p.
6. Fin V.K. Iskusstvennyj intellekt: metodologiya primeneniya i filosofiya [Artificial Intelligence: Application Methodology and Philosophy]. Moscow, Kosand, URSS, 2018, 448 p.
7. Ford Martin. Arhitektura intellekta. Vsyaya pravda ob iskusstvennom intellekte ot sozdatelej [Intelligence architecture. The whole truth about artificial intelligence from the creators]. Moscow, DMK Press, 2018, 311 p.
8. Kilani Y., Bsoul M., Alsarhan A., Al-Khasawneh A. A. Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms. Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms. 2013, 3 (5), pp. 233 – 256.
9. Vagin V.N., Derevyanko A.V., Kutepov V.P. Algoritmy parallelnogo logicheskogo vyvoda i issledovanie ih effektivnosti na komp'yuternyh sistemah [Algorithms of parallel inference and research of their efficiency on computer systems]. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij [Artificial Intelligence and Decision Making]. 2017, 1, pp. 3 – 9.
10. Kalyaev A.V., CHernuhin YU.V., Kalyaev I.A. Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnyh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow, Nauka, 1990, 147 p.
11. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Razbienie slozhnyh zadach na podzadachi v processe planirovaniya celenapravlennoogo povedeniya integral'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v prostranstve sostoyanij [Dividing complex tasks into subtasks in the process of planning the purposeful behavior of an integral unmanned aerial vehicle in the state space]. Morskije intellektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], 2020, 3 (1), pp. 237 – 244.

12. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie povedeniya integral'nogo bespilotnogo letatel'nogo apparata na osnove razbieniya slozhnykh zadach na podzadachi v prostranstve sostoyaniy [Planning the behavior of an integral unmanned aerial vehicle based on dividing complex tasks into subtasks in the state space]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies], 2020, 3 (1), pp. 245 – 252.
13. Melekhin V.B. Model of Representation and Acquisition of New Knowledge by an Autonomous Intelligent Robot Based on the Logic of Conditionally Dependent Predicates. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019, 58(5), pp. 747 – 765.
14. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Nechetkie semanticheskie seti kak adaptivnaya model' predstavleniya znaniy avtonomnykh intellektual'nykh system [Fuzzy semantic networks as an adaptive model for representing knowledge of autonomous intelligent systems]. Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision making]. 2020, 3, pp. 61 – 72.
15. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie dlya prinyatiya priblizhennykh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions]. Moscow: Mir, 1976, 167 p.
16. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie marshruta celenapravlennoy poleta avtonomnogo letatel'nogo apparata na nizkoj vysote v usloviyah neopredelennosti [Planning the route of a purposeful flight of an autonomous aircraft at low altitude in conditions of uncertainty]. Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aviakosmicheskoe priborostroenie], 2018, 1, pp. 18 – 27.
17. Melekhin V.B. Algoritmy avtomaticheskogo formirovaniya modeli okruzhayushchej sredy transportnym robotom [Algorithms for automatic formation of a model of the environment by a transport robot]. Kibernetika [Cybernetics], 1985, 4, pp. 98 – 102.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70; E-mail: pashka1602@rambler.ru

Vladimir B. Melekhin, Dr.Sci. (Eng), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, 367015. Republic of Dagestan, Makhachkala, pr. Imam Shamiya, 70. E-mail: pashka1602@rambler.ru

Михаил Вячеславович Хачумов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва (ФИЦ ИУ РАН), 117313. г. Москва, Россия, пр. 60-летия Октября, д.9; доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов» Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. E-mail: khmike@inbox.ru

Mikhail V. Khachumov, Ph.D. (Phys & Math), Senior Researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Russian Federation (FRC CSC RAS), 117313. pr. 60-letiya Oktyabrya, 9; Docent of the Information Technologies Department, Peoples' Friendship University of Russia, 117198, Moscow Miklukho-Maklaya str. 6.. E-mail: khmike@inbox.ru

Поступила в редакцию: 18.02.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.87 (51-7)

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.027>

Имитационное моделирование эксплуатации морских транспортных средств с учетом ветро-волнового режима

А.А. Карпенко¹, e-mail: st071979@student.spbu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация Эксплуатация морского транспорта подвержена влиянию множества факторов, учет которого требует высокой трудоемкости. Как правило, моделирование морских транспортных систем, выступающих в роли связующего звена различных экономических процессов, производится на стадии предпроектной разработки. На этой стадии, помимо прочего, необходимо оценить влияние на проектируемую систему не только детерминированных, но и стохастических процессов. В данной работе описан алгоритм учета влияния ветро-волновых режимов морских участков на эксплуатацию морских транспортных судов. Данный алгоритм реализован на примере модели системы поставок сжиженного природного газа (СПГ) морским транспортом потребителям г. Мурманск.

Научной новизной данной работы является комплексный подход к логико-математическому описанию эксплуатации морских транспортных средств. Этот подход включает в себя моделирование эксплуатации судна на базе агентного подхода, моделирование ветро-волновых режимов на основе анализа временных рядов и стохастических экспериментов и определение скорости движения судна на основе эмпирико-статистических формул расчета скорости судна и теории гидродинамики судна. В ходе выполнения данной работы была построена имитационная модель поставок СПГ в г. Мурманск морским транспортом. Результаты прогонов этой модели были верифицированы на основе технико-экономического обоснования АО «ЦНИИМФ». Алгоритм построения имитационной модели, описанный в данной работе, может быть применен для имитационного моделирования морских транспортных систем с различными целями функционирования.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, AnyLogic, анализ временных рядов, R, морской транспорт, гидродинамика судна.

Simulation of marine vehicles operation in the state of wind and wave conditions

Alexander A. Karpenko¹, e-mail: st071979@student.spbu.ru

¹St. Petersburg State University, Russian Federation

Abstract. Marine transport operation is affected by a lot of factors taking into account of which requires a high laboriousness. In most cases modelling of marine transport operation as a link in various economic processes is performed at the pre-design development stage. By the way, evaluation of the impact of both deterministic and stochastic processes on the designed system is necessary at this stage. Evaluation of transport system efficiency based on pre-formed system of criteria is in progress at this stage. This paper describes an algorithm for modeling the operation of marine vessels taking into account wind-wave regime of sea areas. This algorithm is implemented by the model of liquified natural gas (LNG) supply chain system by marine transport to consumers of the city of Murmansk.

Scientific novelty of this paper is a complex approach to logical-mathematical description of marine vehicles exploitation. This approach consists of agent-based simulation of vessel exploitation, modelling of wind-wave regimes by means of time series analysis and stochastic modelling and the speed determination of the vessel movement based on the empirical-statistical formulas for calculating the speed of the vessel and the theory of vessel hydrodynamics. During this research simulation model LNG supply chain system by marine transport to consumers of the city of Murmansk was developed. The results of the model have been verified by the feasibility study performed by CNII MF JSC. The algorithm for constructing simulation model described in this paper could be implemented in modelling of marine transport system for various purposes.

Key words: Simulation, AnyLogic, timeseries analysis, R, marine transport, ship hydrodynamics.

Введение

Эксплуатация морских транспортных судов сопряжена с высокими затратами, величина которых в значительной степени зависит от продолжительности и структуры времени рейса. На величину эксплуатационных затрат морского судна оказывают влияния различные внутренние и внешние факторы, учет которых с помощью аналитического моделирования является задачей с низкой гибкостью реализации относительно вариации исходных данных проекта. В таких ситуациях применение средств имитационного моделирования позволяет построить логико-математическую компьютерную модель

исследуемого объекта, позволяющую в ходе экспериментов над ней получить необходимую исследователю информацию о возможностях по снижению затрат на реализацию рассматриваемого проекта.

Особенно актуальным является применение средств имитационного моделирования в исследовании комплексной транспортной системы со множеством уровней вариативности: вариативность маршрута транспортных средств, вариативность типоразмера самих транспортных средств, вариативность расположения пунктов отправления и пунктов назначения, а также их количества, вариативность вида перевозимого груза. А также с факторами, имеющими стохастическую природу:

изменчивость гидрометеорологических условий навигации, длительность задержек при осуществлении портовых операций (длительность нахождения в очереди из-за конфигурации портовых служб как системы массового обслуживания) и т.д.

В данной работе акцентировано внимание на моделировании ветро-волновых режимов районов эксплуатации морских транспортных средств, а также на расчете приращения скорости судов, вызываемого ветро-волновыми режимами соответствующих морских участков эксплуатации.

Стоит отметить, что термины «морской участок» (при описании эксплуатации морских транспортных средств) и «район моря» (при районировании морей в океанографии) в настоящей работе являются взаимозаменяемыми. В дальнейшем при обсуждении эксплуатации морских транспортных судов будет использоваться термин «морской участок».

1. Краткое описание исследуемых объектов

Задачей реализуемого проекта является выбор оптимальных значений параметров транспортной системы поставок на проектируемый терминал для приема, хранения и регазификации сжиженного природного газа (СПГ) в Мурманской области. Такими параметрами являются маршрут транспортировки, типоразмер судна и вместимость хранилища СПГ для каждого из двух вариантов потребления. Критерием оптимизации является минимум совокупных затрат на реализацию данного проекта. Оптимизация проводится для каждого из двух вариантов потребления СПГ: потребление только котельными ПАО «Мурманская ТЭЦ» и потребление котельными ПАО «Мурманская ТЭЦ» и иными (перспективными) потребителями г. Мурманск и Мурманской области.

К проекту транспортной системы газоснабжения предъявлены следующие требования:

- обеспечивать необходимый объем потребления газа, меняющийся ежемесячно – дефицит газа при снабжении рассматриваемых потребителей г. Мурманск считается недопустимым;

- учитывать различие между двумя вариантами потребления СПГ;

- соблюдать неснижаемый запас СПГ в хранилище, уровень которого зависит от максимального суточного объема потребления, а также от вместимости хранилища – данное требование обеспечивает поддержание СПГ в хранилище в захлаженном состоянии (при температуре $-160,4\text{ }^{\circ}\text{C}$);

- доставка СПГ в г. Мурманск газовозами должна осуществляться по мере необходимости, но не реже, чем 1 раз в месяц – при длительном хранении СПГ в хранилище (более 1 месяца) происходит изменение физико-химических свойств СПГ, в связи с чем необходимо добавлять новый газ для «обновления» СПГ.

Подробнее о моделировании рассматриваемой системы поставок изложено автором в его работах [9], [10].

Маршрут транспортировки характеризуется расположением пунктов отправления (порт Выборг или Высоцк, порт Усть-Луга, СПГ-терминал на о. Кильдин или в Ура-Губе) и назначения (г. Мурманск). Маршруты следования газовозов проходят по

Балтийскому, Северному, Норвежскому и Баренцеву морям. Следовательно, в качестве факторов, влияющих на эксплуатацию морских судов, рассматриваются ветро-волновые режимы районов вышеуказанных морей: Балтийское море (7 районов), Северное море (3 района), Норвежское море (2 района) и Баренцево море (4 района) [15], [16]. Каждый из рассматриваемых районов морей имеет уникальный ветро-волновой режим.

К рассматриваемой системе поставок предъявляются обязательные к исполнению требования о недопустимости дефицита поставляемого СПГ. С другой стороны, достижение целевого (минимального) значения совокупных затрат на реализацию данного проекта подразумевает минимизацию суммы операционных (связанных с эксплуатацией судов) и капитальных (связанных с постройкой судов) затрат проекта. В связи с этим одним из главных результатов моделирования данной системы является расписание поставок, при котором выполняются следующие условия:

- транспортные суда выходят в рейс в такие моменты времени, чтобы после их прибытия в пункт назначения и разгрузки СПГ в хранилище было не менее неснижаемого уровня запаса СПГ;

- пополнение СПГ в хранилище в пункте назначения производится не реже 1 раза в месяц;

- достижение наибольшей загрузки судна, в т.ч. путем сокращения порожних (без груза) пробегов.

Однако соблюдение расписания рейсов морских транспортных судов подвержено существенному влиянию со стороны гидрометеорологических условий навигации, которое следует учитывать.

2. Постановка задачи

Наравне с построением глобальных волновых моделей в области геофизической гидродинамики, основанных на спектральном представлении волнового поля [12], в исследовательской деятельности имеет место исследование временных рядов гидрометеорологических параметров и построение моделей временных рядов [21], [22]. В совокупности с физической сущностью каждого из природных явлений построенные модели могут иметь высокую надежность и состоятельные оценки коэффициентов в модели. Основными физическими явлениями, рассматриваемыми в данной работе, являются глобальная циркуляция вод мирового океана и глобальная циркуляция атмосферы [13]. Помимо данных явлений также рассматривается воздействие движения воздушных масс на движение поверхностного слоя воды [5].

Учет влияния ветро-волнового режима на приращение скорости судна осуществляется с применением эмпирико-статистических моделей и моделей воздействия гидродинамических сил на судно при поступательном движении. Исходными данными для этих моделей, помимо характеристик судов, являются: направление и скорость ветра, высота и курсовой угол бега ветровых волн, численные значения воздушного сопротивления соответствующего угла ветра и полного сопротивления воды подводной части судна.

Таким образом, первой задачей имитационного моделирования эксплуатации морских судов является создание модуля генерации

гидрометеорологических условий навигации в виде моделей временных рядов направления и скорости ветра, скорости, высоты и направления бега ветровых волн. Дискретность моделей определяется дискретностью доступных для анализа статистических данных исследовательской системы островов Тихого океана университета Гавайи за 2016-2020 гг. [6], [7].

Стоит отметить, что в настоящем исследовании влиянием зыби на эксплуатацию морских транспортных судов пренебрегается.

Второй задачей имитационного моделирования эксплуатации морских транспортных судов является построение логико-математического описания процесса эксплуатации, включающего в себя модуль расчета скорости движения судна. Данный модуль в каждый момент времени должен учитывать:

- местонахождение, технические и эксплуатационные характеристики судна;
- гидрометеорологические условия навигации морского участка, в котором судно находится.

Данный модуль реализован с применением средств агентного имитационного моделирования в среде имитационного моделирования AnyLogic.

Третьей задачей имитационного моделирования эксплуатации морских транспортных судов является обеспечение взаимодействия между модулем генерации гидрометеорологических условий навигации и модулем расчета скорости движения судна.

3. Построение модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

3.1. Моделирование векторной скорости ветра

Для учета физической сущности исследуемых природных явлений (а именно - временной и пространственной корреляции) строится карта с векторами гипотетических перемещений воздушных масс (рис. 1).

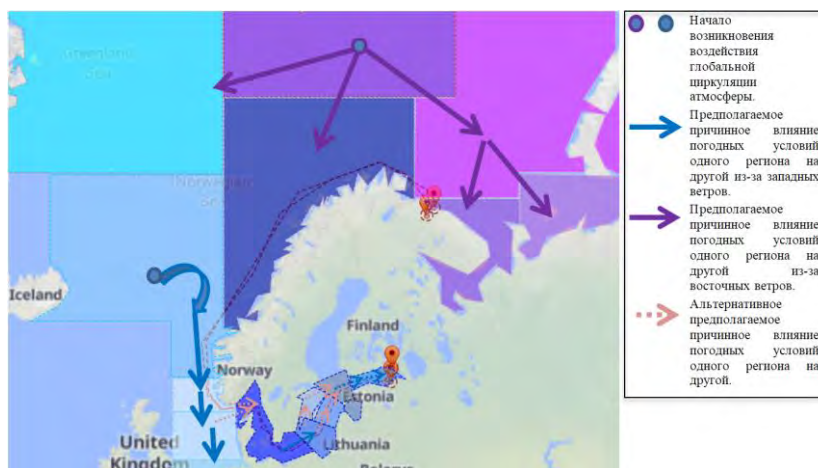


Рис.1. Районирование морских участков и распределение векторов гипотетических перемещений воздушных масс

На рисунке продемонстрированы векторы гипотетического перемещения воздушных масс между соседними морскими участками на основе западных ветров (голубой цвет векторов) и восточных ветров (сиреневые вектора). Наравне со всеми векторами, однозначно отражающими воздействие гидрометеорологических условий между соседними морскими участками, имеются вектора (темно-оранжевого цвета), отражающие воздействия, направления которых необходимо проверить с помощью специализированных статистических тестов (например, тест на причинность по Грейнджеру [20]).

Построение моделей временных рядов направления и скорости ветра осуществляется по следующему алгоритму:

- определение морских участков, по территории которых проходит непосредственное воздействие глобальной циркуляции атмосферы (ключевых участков) – такими участками были выбраны первый регион Норвежского моря (перемещение западных ветров со стороны экватора) и четвертый регион Баренцева моря (перемещение восточных ветров в Северном полушарии);
- определение для каждого из морских участков центра участка;

- построение многомерного временного ряда векторной скорости ветра вместо направления и абсолютной скорости – с целью соблюдения первичных условий стационарности [8];

- приведение многомерного временного ряда к стационарному и коинтегрированному виду.

Далее, алгоритм разделяется на работу с ключевыми морскими участками и морскими участками, смежными с ключевыми. Так, для моделирования временных рядов векторной скорости ветра для ключевых морских участков осуществляются:

- выбор оптимальной модели временного ряда (VARMA(p,q) или SVARMA(p,q)(P,Q)(L)) с точки зрения минимума значения Байесовского информационного критерия (или критерия Шварца) (BIC или SBIC) [25] или Акаике (AIC) [19] –проводится на языке программирования R (в качестве среды разработки выбрана среда RStudio);
- верификация построенной модели путем проверки остатков на стационарность (проверки по столбцам, проверки всего многомерного временного ряда с использованием статистики Льюинга-Бокса [24]).

Для моделирования многомерных временных рядов векторной скорости ветра в морских участках,

смежных с ключевыми, осуществляется выбор оптимальной модели временного ряда (VARX(p,m)) и ее верификация – аналогично предыдущему.

Построенные модели временных рядов для гидрометеорологических параметров ключевых морских участков используются вместе с эмпирическими законами распределения с целью учета в моделировании стохастики исследуемых параметров. Эмпирический закон распределения для каждого ключевого морского участка по каждой проекции скорости ветра представляет собой матрицу, в которой по столбцам указаны месяцы, а по строкам – интервалы значений проекции скорости ветра. Эмпирические законы распределения построены по гистограмме частот обучающих

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix}_t + \sum_{i=2}^p \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_i * \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{t-i} + \sum_{j=1}^q \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}_j \begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix}_{t-j} \quad (1)$$

где: $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_t$ – вычисляемые значения проекций скорости ветра в момент времени t, $\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \end{pmatrix}$ – свободный член модели временного ряда, $\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix}_t$ – сгенерированные по эмпирическому распределению значения проекций скорости ветра в момент времени t, $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}_{t-i}$ – исторические значения проекций скорости ветра в момент времени t-i, $\begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix}_{t-j}$ – остатки проекций скорости ветра от авторегрессионной составляющей в момент времени t-i, $\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}_i$ – матрица коэффициентов модели для авторегрессионной части на лаге i, $\begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}_j$ – матрица коэффициентов модели для части остатков (скользящей средней) модели на лаге j.

Построенные модели временных рядов используются для генерации векторных скоростей ветра по каждому из рассматриваемых морских участков и пересчета их в направление ветра и абсолютную скорость ветра для дальнейших расчетов.

3.2. Моделирование векторной скорости ветровых волн

Гипотезы по распределению направления ветровых волн аналогичны гипотезам перемещения воздушных масс, т.к. эмпирически установлено, что направление бега ветровых волн не отличается от направления ветра более чем на 45 градусов [15], [16].

Исследование динамики параметров ветровых волн также должно быть сфокусировано на многомерном временном ряду векторной скорости бега ветровых волн вместо временных рядов направления и абсолютной скорости бега. В связи с этим имеющиеся данные о направлении бега ветровых волн преобразуются по следующему алгоритму:

- рассчитывается абсолютная скорость ветра (W) для регионов, по которым имеется информация о динамике ветровых волн;

- рассчитывается коэффициент крутизны волны (ε) по формуле (2), длина разгона волны (D) по формуле (3) и длина волны (L) по формуле (4) [4]:

$$\varepsilon = \frac{1}{0.9\sqrt{100+W^2}} \quad (2)$$

$$D = 30W^2\varepsilon \quad (3)$$

$$L = 0.073 * W * \sqrt{\frac{D}{\varepsilon}} \quad (4)$$

- в случае отсутствия временных рядов абсолютной скорости бега ветровых волн используются модельные значения (v)(5):

выборки. В среде AnyLogic эмпирические законы распределения представлены в виде табличных функций, которые заполняются при инициализации модели.

Таким образом, генерация значений проекций скоростей ветра для ключевых морских участков происходит в следующем порядке:

- генерация значений проекций скоростей по эмпирическим законам распределения;

- вычисление значений проекций скоростей ветра по модели временного ряда вида VARMA(p,q) (p – порядок авторегрессионного лага, q – порядок лага скользящей средней), используя сгенерированные и исторические значения (1):

$$v = 1.25\sqrt{L} \quad (5)$$

- преобразование абсолютной скорости и направления бега ветровых волн (φ) в векторную скорость бега ветровых волн – на широтную (v_x) и долготную (v_y) оси (6). Стоит отметить, что полученные направления бега волн измеряются в румбовых углах [23], в связи с чем в уравнении проекций синус и косинус меняются местами:

$$v_x = -v \cdot \sin\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right), v_y = -v \cdot \cos\left(\frac{\varphi\pi}{180}\right) \quad (6)$$

Дальнейший порядок проведения анализа временных рядов векторной скорости бега ветровых волн совпадает с порядком проведения анализа временных рядов векторной скорости ветра: построение и выбор оптимальной модели временного ряда и ее верификация.

Построенные модели временных рядов векторной скорости бега ветровых волн также используются для их генерации по каждому из рассматриваемых морских участков. Сгенерированные векторные скорости пересчитываются обратно в высоту, направление и скорость бега ветровых волн.

3.3. Программная реализация модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

Реализация полученных моделей временных рядов векторной скорости ветра и бега ветровых волн в среде AnyLogic происходит следующим образом. В имитационной модели создается java-класс генератора гидрометеорологических условий навигации. На основе этого класса на главном уровне (в данном случае – на уровне агента Main) имитационной модели создается популяция (коллекция) агентов – по одному агенту на исследуемый морской участок. Каждый из агентов представляет собой экземпляр java-класса

генератора гидрометеорологических условий, полями которого являются ключевые параметры ветро-волнового режима (направление и скорость ветра, высота, направление и скорость бега ветровых волн) и функциональные зависимости между ними.

Для каждого из агентов строится многоугольный узел библиотеки разметки пространства (в случае использования GIS-карты – GIS-регион), который является значением поля «Местоположение» этого агента с целью дальнейшего определения морского участка, по территории которого движется судно.

В момент запуска имитационной модели выполняются функции, рассчитывающие начальные значения параметров ветро-волновых режимов по всем морским участкам в порядке, предусмотренном распределением векторов перемещений воздушных масс.

4. Построение модуля расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов

Модуль расчета скорости движения судна является частью диаграммы состояний эксплуатации судна, которая описывает выполнение расписания рейсов поставок. При моделировании выхода судна в рейс запускается цикл расчета скорости движения судна с шагом, соответствующим дискретности моделей временных рядов. На каждом шаге выполняются следующие действия:

- определяется принадлежность судна к одному из рассматриваемых морских участков маршрута;
- выполняется оценка потери скорости судна из-за ветровых волн;
- выполняется оценка потери скорости судна из-за ветра.

Стоит отметить, что учет влияния волнения на эксплуатацию судна происходит при допущении того, что система автоматического управления (САУ) движения судна при волнении допускает снижение мощности двигателей и, соответственно, скорости для обеспечения безопасной работы судовой энергетической установки [3].

Определение принадлежности судна к одному из рассматриваемых морских участков маршрута осуществляется путем сопоставления местоположения судна (координат в пикселях или широты и долготы) с местоположением морских участков каждого из экземпляров java-класса гидрометеорологических условий навигации.

В качестве функциональной зависимости между параметрами ветровых волн и приращением скорости судна на волнении были рассмотрены две: формула П.М. Хохлова [17] и формула, описанная Вагущенко Л.Л. и Цымбал Н.Н. в их учебном пособии [3]. Поведение данных функций было проанализировано в рамках эксперимента варьирования параметров: каждый из аргументов функции изменялся в ограниченном допустимом диапазоне значений, а поведение функций верифицировалось путем его сопоставления с информацией о поведении судна на волнении на основе материалов [11], [18], в которых описаны следующие положения.

При попутном волнении прирост скорости судна недопустим по причине риска бродяжничества: если скорость волны больше скорости судна, винт

закручивается так, что его момент стремится развернуть судно лагом к волне; если скорость волны меньше скорости судна, судно захватывается задним склоном волны и не может из нее выйти даже при повышенной мощности двигателей. Следовательно, в формуле расчета приращения скорости судна не должно быть положительного прироста скорости при попутном волнении, а также не должно быть положительного прироста скорости судна при увеличении мощности двигателей.

Таким образом, для оценки приращения скорости судна из-за ветровых волн (ΔV_v) используется эмпирико-статистическая формула из учебного пособия [3], принимающая на вход значения высоты ветровых волн, м (h_z), скорости движения судна в спокойной воде, узл (V_0), курсовой угол бега ветровых волн, рад. (q_w), длина судна, м (L) (7):

$$\Delta V_v = \frac{0,01 * V_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{5 * q_w}{\pi}\right)^2}} * \left(\frac{175 * h_z * \sqrt{h_z}}{L} + 0,32 * h_z^2 \right) \quad (7)$$

Для оценки приращения скорости судна из-за ветра используется формула В.В. Дремлюга [5], прошедшая верификацию по данным материалов [2]. На вход данной функции расчета приращения скорости судна из-за ветра, узл. (ΔV_w) принимаются абсолютная скорость ветра, м/с (W), курсовой угол бега ветра, град. (q_w), ветровой коэффициент ($K_q = c_x S / 81 \xi \Omega$), коэффициент воздушного сопротивления соответствующего курсового угла ветра (c_x), площадь проекции подводной части судна на плоскость миделя, м² (S), коэффициент полного сопротивления подводной части судна (ξ), площадь смоченной поверхности судна (Ω) (8):

$$\Delta V_w = V_0 - \sqrt{\frac{V_0^2 (1 + K_q) - K_q W^2}{1 + K_q}} - \frac{K_q W}{1 + K_q} \cos q_w \quad (8)$$

Расчет ветрового коэффициента производится поэлементно по данным [1]. Так, коэффициент воздушного сопротивления соответствующего курсового угла ветра определяется в зависимости от типа судна и курсового угла ветра [1]. Коэффициент полного сопротивления воды подводной части судна представляет собой сумму коэффициентов сопротивления трения, сопротивления формы и волнового сопротивления [1]. Для расчета составляющих коэффициента полного сопротивления воды используются следующие данные:

- значение числа Фруда (Fr), зависящее, в том числе, от ускорения свободного падения (g) [1] (9):

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{g * L}} \quad (9)$$

- кинематическая вязкость воды, зависящая от ее температуры (σ) [1];

- значение числа Рейнольдса (Re) [1] (10):

$$Re = \frac{V_0 * L}{\sigma} \quad (10)$$

- аппроксимация зависимости коэффициента волнового сопротивления от чисел Фруда на основе графика по причине отсутствия у автора формулировки функциональной зависимости в явном виде [1].

Расчет приращения скорости движения судна из-за ветро-волновых потерь, имитация движения судна с рассчитанной скоростью и аккумуляция статистических данных о характеристиках рейса

судна производится встроенными средствами среды AnyLogic.

5. Результаты имитационного моделирования эксплуатации морских судов с учетом ветро-волновых режимов

Для верификации алгоритма генерации гидрометеорологических условий навигации были взяты данные из обучающей выборки построенных моделей, т.е. из источника, используемого при построении данного алгоритма [6], [7].

Верификация модельных значений гидрометеорологических условий навигации проведена отдельно по выборкам ключевых морских участков и морских участков, смежных с ключевыми. Данные выборки были составлены в ходе проведения эксперимента Монте-Карло в среде AnyLogic на протяжении 488 прогонов имитационной модели.

Критериями сравнения были выбраны относительные отклонения (по модулю) по основным описательным статистикам (среднее, минимум, максимум), по коэффициенту автокорреляции первого порядка выборок проекций скоростей ветра, направления и высоты ветровых волн, а также результаты статистических тестов Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни для двух выборок. Нулевая гипотеза данных тестов заключается в предположении о том, что распределение рассматриваемых параметров между исследуемыми выборками (модельной и обучающей) не имеют статистически значимых различий. Статистические тесты проводятся на уровне значимости 0,05.

Результаты верификации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты верификации модуля генерации гидрометеорологических условий навигации

Тип морского участка	Модуль	Целевой показатель критерия сравнения	Среднее значение критерия сравнения
Ключевой	Ветер	Основные описательные статистики	37,61%
		Коэффициент автокорреляции	14,37%
	Волны	Основные описательные статистики	26,37%
		Коэффициент автокорреляции	1,76%

Не ключевой	Ветер	Основные описательные статистики	33,24%
		Коэффициент автокорреляции	2,59%
	Волны	Основные описательные статистики	9,05%
		Коэффициент автокорреляции	3,27%

По данным таблицы 1 видно, что реализованный алгоритм моделирования временной корреляции обеспечивает незначительные отклонения коэффициента автокорреляции выборки модельных значений от выборки фактических значений. Однако относительные отклонения (по модулю) описательных статистик выборки модельных значений от выборки фактических значений слишком велики, чтобы утверждать, что выборки взяты из одной и той же генеральной совокупности.

Также по результатам проведения статистических тестов Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни была отвергнута нулевая гипотеза для всех морских участков, что означает наличие статистически значимых различий в распределении модельных и фактических значений проекций скорости ветра и параметров ветровых волн.

Для верификации алгоритма расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов участков эксплуатации необходима следующая информация: установленная капитаном судна скорость движения (узл), географические координаты судна, достигнутая скорость движения судна (узл) с дискретностью модуля генерации гидрометеорологических условий навигации. Однако получить такие данные из открытых источников практически невозможно, поэтому базой сравнения результатов применения данного алгоритма являются результаты технико-экономического обоснования [14].

Верификация модельных значений эксплуатационных показателей судов проведена по выборкам средней длительности морского перехода из пункта погрузки в пункт выгрузки, а также по среднемесячной потребности в судах в среднем по двум вариантам потребления СПГ. Данные выборки также сформированы в ходе проведения эксперимента Монте-Карло в среде AnyLogic на протяжении 488 прогонов имитационной модели.

Таблица 2

Результаты верификации модуля расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых режимов

Исследуемое судно	Период навигации	Целевой показатель критерия сравнения	Среднее значение критерия сравнения
Судно №1 (емкость 8000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	2,28%
		Потребность во флоте	0,61%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	4,73%
		Потребность во флоте	2,62%

Судно №2 (вместимость 17000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	1,41%
		Потребность во флоте	7,13%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	1,37%
		Потребность во флоте	10,55%
Судно №3 (вместимость 23000 куб.м.)	Зимне-весенний	Длительность морского перехода	0,22%
		Потребность во флоте	9,52%
	Летне-осенний	Длительность морского перехода	0,28%
		Потребность во флоте	11,01%

Среднее относительное отклонение (по модулю) модельных значений целевых показателей критерия сравнения от полученных при выполнении ТЭО составило: для потребности в судах – 6,91%, для средней длительности морского перехода – 1,72%.

Также по данным таблицы 2 прослеживается увеличение среднего относительного отклонения (по модулю) с ростом вместимости исследуемого судна. Такая динамика объясняется в следующем. С ростом вместимости грузовых танков рассматриваемых транспортных средств увеличивается их габаритная длина, что влечет за собой рост приращения скорости из-за ветро-волновых режимов регионов эксплуатации. Поскольку модельные значения параметров гидрометеорологических условий навигации имеют большие отклонения от фактических значений, увеличение приращения скорости влечет за собой увеличение относительного отклонения модельных значений эксплуатационных показателей от значений базы сравнения.

Заключение

В настоящей работе описан алгоритм моделирования учета ветро-волновых режимов морских участков в моделировании эксплуатации морских транспортных судов. Данный алгоритм включает в себя реализацию двух модулей расчета: модуль генерации гидрометеорологических условий

навигации и модуль расчета скорости движения судна с учетом ветро-волновых потерь.

Однако оценка точности применимых методов весьма ограничена по ряду причин, ключевой из которых является отсутствие или скудность натуральных наблюдений за поведением судна на волнении. Рассмотренные в данной работе методы основаны на экспериментальных рейсах судов, с момента постройки которых технологии судостроения претерпели значительные изменения. Получение натуральных данных о поведении на волнении судов морально считающихся актуальными, в т.ч. в рамках экспериментальных рейсов, существенно ограничено, поскольку не имеет привлекательности для судовладельцев.

Перспективой развития модуля генерации гидрометеорологических условий навигации является использование моделей, использующихся в метеорологии, с целью учета гораздо большего множества факторов, влияющих на волновое действие. Примером такой модели является WaveWatch III – программный комплекс, разработанный в Национальном центре атмосферы и океана США (NOAA). С учетом существующего исследовательского опыта по объединению волновой модели WaveWatch III и атмосферной модели Weather Research & Forecasting [12], имеется перспектива в создании модуля генерации гидрометеорологических условий навигации на качественно новом уровне.

Литература

1. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна: Сопротивление воды, движители, управляемость и качка: учеб. пособие для вузов водного транспорта. Л.: Речной транспорт. Ленингр. отд-ние, 1961. 684 с.
2. Бояринов А.М., Ершов А.А., Пылаев С.М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017 г. Том 9 №6. С. 1168-1174
3. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Фенікс, 2007. 329 с.
4. Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состоянии моря. Л.: Гидрометео-. издат, 1980. 232 с.
5. Дремлюг В.В., Гордиенко А.Н. Гидрометеорологическое обеспечение судовождения: учебник для вузов мор.транс. М.: Транспорт, 1989. 240 с.
6. Исследовательская система островов Тихого океана. Университет Гавайи [Электронный ресурс]. URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ncep_global.html (дата обращения: 04.02.2021)
7. Исследовательская система островов Тихого океана. Университет Гавайи [Электронный ресурс]. URL: https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/www3_global.html (дата обращения: 04.02.2021)
8. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // Лекционные и методические материалы. Экономический журнал ВШЭ, N 1-4, 2002. С. 81 – 523.
9. Карпенко А.А. Имитационное моделирование транспортной системы снабжения сжиженным природным газом города Мурманск и Мурманской области // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019.

- Материалы Международной научно-практической конференции. Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. 2019. С. 199-203.
10. Карпенко А.А. Оптимизация транспортной системы снабжения сжиженным природным газом г. Мурманск с использованием морского транспорта // Выпускная квалификационная работа по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ "СПБГУ", 2019. 82 с.
 11. Козырь Л.А., Аксютин Л.Р. Управление судами в шторм. М.: Транспорт, 1973. 112 с.
 12. Кузнецова А.М. Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах/диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», 2019. 110 с.
 13. Переведенцев Ю.П. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие. Казань: Казан.ун-т, 2013. 224 с.
 14. Предпроектная документация. Выбор и обоснование оптимальной логистической схемы доставки СПГ на Объект // 18-19-1/51.01.14.4.24-19-1-ОИ.2. АО «ЦНИИМФ», СПб., 2019. 153 с.
 15. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Российский морской регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2006. 452 с.
 16. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / Российский морской регистр судоходства. СПб.:РМРС, 2003. 214 с.
 17. Хохлов П.М. Учет воздействия волнения на судно повышает безопасность плавания и эффективность работы флота // ММФ ЦБНТИ, серия "Безопасность мореплавания". N 6(31), М., 1969. С. 9-51.
 18. Чижимов С.Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре:ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. 110 с.
 19. Akaike H. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control 19, 1974. P. 716-723.
 20. Granger C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica 37, 1969. P. 424-438.
 21. Hering A.S., Kazor K., Kleiber W. A Markov-Switching Vector Autoregressive Stochastic Wind Generator for Multiple Spatial and Temporal Scales. Resources 2015, 4, 70-92. <https://doi.org/10.3390/resources4010070> (дата обращения: 18.03.2020)
 22. Izaskun B.M., Garcia Morales R.M., Marino J., de los Santos F.: A Decision Support Tool for Port Planning Based on Monte Carlo Simulation, Proc. 2018 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2018. P. 2885 – 2896.
 23. Marine modeling and analysis branch. NOAA NWS NCEP environmental modeling center: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php> (дата обращения: 21.03.2020)
 24. Ruey S. Tsay. Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications. John Wiley. Hoboken, NJ. 2014. 520p.
 25. Schwartz G. Estimating the dimension of a model. The Annals of Statistics 5, 1978. P. 461-464.

References

1. Basin A.M., Anfimov V.N. Gidrodinamika sudna: Soprotivlenie vody, dvizhiteli, upravlyaemost' i kachka [Vessel hydrodynamics: Water resistance, propellers, controllability and pitching]: ucheb. posobie dlya vuzov vodnogo transporta. L.: Rechnoy transport. Leningr. otd-nie, 1961. 684 p.
2. Boyarinov A.M., Ershov A.A., Pylaev S.M. Analiz primenimosti formul rascheta vetro-volnovykh poter' skorosti khoda morskikh sudov [Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves]. Vestnik Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2017 g. Part 9 N 6. pp. 1168-1174
3. Vagushchenko L.L., Tsymbal N.N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna [Automatic ship movement control systems]. Odessa: Feniks, 2007. 329 p.
4. Vasil'ev K.P. Chto dolzhen znat' sudovoditel' o kartakh pogody i sostoyanii morya [What a boatmaster needs to know about weather charts and the state of the sea]. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 232 p.
5. Dremlyug V.V., Gordienko A.N. Gidrometeorologicheskoe obespechenie sudovozhdeniya [Hydrometeorological support for navigation]: uchebnik dlya vuzov mor.trans. M.: Transport, 1989. 240 p.
6. Issledovatel'skaya sistema ostrovov Tikhogo okeana [Pacific islands Ocean observing system]. The University of Hawai'i. https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ncep_global.html (accessed February 4, 2021)
7. Issledovatel'skaya sistema ostrovov Tikhogo okeana [Pacific islands Ocean observing system]. The University of Hawai'i. https://pae-paha.pacioos.hawaii.edu/erddap/griddap/ww3_global.html (accessed February 4, 2021)
8. Kantorovich G.G. Analiz vremennykh ryadov [Timeseries analysis]. Lektsionne i metodicheskie materialy. Ekonomicheskii zhurnal VShE, N 1-4, 2002. pp. 81 – 523.
9. Karpenko A.A. Imitatsionnoe modelirovanie transportnoy sistemy snabzheniya szhizhennym prirodnyim gazom goroda Murmansk i Murmanskoy oblasti [Simulation modeling of transport system of liquefied natural gas supply of Murmansk and Murmansk region]. Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2019. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences. 2019. pp. 199-203.
10. Karpenko A.A. Optimizatsiya transportnoy sistemy snabzheniya szhizhennym prirodnyim gazom g. Murmansk s ispol'zovaniem morskogo transporta [Optimization of supplying system for Murmansk by liquefied natural gas using marine transport]. Graduation project. Applied Mathematics and Computr Science. Saint-Petersburg State University, 2019. 82 p.
11. Kozyr' L.A., Aksyutin L.R. Upravlenie sudami v shtorm [Steering a ship during the storm]. M.: Transport, 1973. 112 p.

12. Kuznetsova A.M. Chislennoe modelirovanie poverkhnostnogo vetrovogo volneniya na korotkikh razgonakh [Numerical modeling of surface wind waves at short accelerations]. PhD thesis. Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 2019. 110 p.
13. Perevedentsev Yu.P. Teoriya obshchey tsirkulyatsii atmosfery [Atmospheric general circulation theory]: uchebnoe posobie. Kazan': Kazan` State University, 2013. 224 p.
14. Predproektnaya dokumentatsiya. Vybor i obosnovanie optimal'noy logisticheskoy skhemy dostavki SPG na Ob"ekt [The choice and justification of the optimal logistic scheme of cargo delivery to the Object]. 18-19-1/51.01.14.4.24-19-1-OI.2. CNIIMF JSC, SPb., 2019. 153 p.
15. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Baltiyskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas]. Saint-Petersburg, Russian register of shipping, 2006. 452 p.
16. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiyskogo morey [Reference data on the wind and wave regime in the Barents, Okhotsk and Caspian seas]. Saint-Petersburg, Russian register of shipping, 2003. 214 p.
17. Khokhlov P.M. Uchet vozdeystviya volneniya na sudno povyshayet bezopasnost' plavaniya i effektivnost' raboty flota [Accounting for the impact of the waves on the vessel increases the safety of navigation and the efficiency of fleet operations]. Ministry of the Navy. Central Bureau of Scientific and Technical Information, " Navigation safety ". N 6(31), M., 1969. pp. 9-51.
18. Chizhiumov S.D. Osnovy dinamiki sudov na volnenii [The fundamentals of ship dynamics on the waves]: Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'sk-na-Amure state technical university, 2010. 110 p.
19. Akaike H. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Autom. Control 19, 1974. P. 716-723.
20. Granger C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. Econometrica 37, 1969. P. 424-438.
21. Hering A.S., Kazor K., Kleiber W. A Markov-Switching Vector Autoregressive Stochastic Wind Generator for Multiple Spatial and Temporal Scales. Resources 2015, 4, 70-92. <https://doi.org/10.3390/resources4010070> (accessed March 18, 2020)
22. Izaskun B.M., Garcia Morales R.M., Marino J., de los Santos F.: A Decision Support Tool for Port Planning Based on Monte Carlo Simulation, Proc. 2018 Winter Simulation Conference, Las Vegas, D.C., 2018. P. 2885 – 2896.
23. Marine modeling and analysis branch. NOAA NWS NCEP environmental modeling center: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php> (accessed March 21, 2020)
24. Ruey S. Tsay. Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications. John Wiley. Hoboken, NJ. 2014. 520p.
25. Schwartz G. Estimating the dimension of a model. The Annals of Statistics 5, 1978. P. 461-464.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Александрович Карпенко, аспирант кафедры Вычислительных методов механики деформируемого тела, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9, e-mail: st071979@student.spbu.ru

Alexander A. Karpenko, graduate student of the Department of Computational Methods in Continuum Mechanics, St. Petersburg state University, Universitetskaya Emb. 7-9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: st071979@student.spbu.ru

Поступила в редакцию: 17.03.2021
Принята к публикации: 15.05.2021

УДК 629.12.001.2

<https://doi.org/10.37220/MIT.2021.52.2.028>

Планирование рейсооборота добывающих судов

С.В. Лисиенко¹ e-mail: lisienkosv@mail.ru, Н.С. Иванко¹ e-mail: invs@mail.ru¹ Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация В работе предлагается организация планирования рейсооборота добывающих судов в многовидовой промысловой системе «промысловая зона» с учетом динамически меняющихся во времени условий ведения рыбодобывающей деятельности. Построены модель и алгоритм оптимизационной задачи планирования рейсооборота добывающих судов, учитывающие временные издержки и потери на всех этапах планирования промыслового рейса, на примере добычи кальмара командорского в Северо-Курильской зоне Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна. Проведен факторный анализ промысловой деятельности группы добывающих судов, осуществлявших добычу кальмара командорского в период 2018-2019 гг. в Северо-Курильской зоне. Выявлены производственные и непроизводственные потери времени добывающих судов за период промысловой доступности исследуемого объекта, так же дана интервальная оценка временных издержек на каждом из трех этапов планирования рейсооборота для промысла кальмара командорского.

Ключевые слова: Промышленное рыболовство, многовидовая система, технология добычи, общий допустимый улов, Северо-Курильская зона, добыча водных биологических ресурсов, математическая модель промысла, оптимизация.

Planning of the voyage turnover of producing vessels

Svetlana V. Lisienko¹ e-mail: lisienkosv@mail.ru, Nina S. Ivanko¹ e-mail: invs@mail.ru¹Far Eastern state technical fishery University

Abstract. The paper proposes the organization of planning the voyage turnover of mining vessels in the multi-species fishing system "fishing zone", taking into account the dynamically changing conditions of fishing activities. A model and an algorithm for optimizing the task of planning the voyage turnover of mining vessels, taking into account the time costs and losses at all stages of planning a fishing voyage, are constructed on the example of the production of Komandorsky squid in the North Kuril zone of the Far Eastern fisheries basin. A factor analysis of the fishing activity of a group of mining vessels that carried out the extraction of Komandorsky squid (*Beryteuthis magister*) in the period 2018-2019 in the North Kuril zone was carried out. Production and non-production time losses of mining vessels during the period of commercial availability of the object under study are identified, as well as an interval estimate of time costs at each of the three stages of planning the voyage rotation for the Komandorsky squid fishery.

Key words: Industrial fishing, multi-species system, extraction technology, total allowable catch, North Kuril zone, extraction of aquatic biological resources, mathematical model of fishing, optimization.

Введение

Планирование рыбодобывающей деятельности в контексте совершенствования ее системной организации в многовидовых промысловых системах - промысловых зонах рыбохозяйственных бассейнов является на сегодняшний день основополагающим процессом в достижении программных показателей отечественного рыболовства [1].

Основными количественными показателями рыбодобывающей деятельности являются объемы вылова водных биологических ресурсов, которые в дальнейшем формируют ее качество – степень освоения биоресурсов.[2-3]

Совокупности промысловых объектов, составляющие сырьевую базу рыболовных зон и подзон, обладают промысловой доступностью в определенные периоды времени. Этот компонент любой промысловой зоны является первым компонентом, определяющим ее двуединую природу – биотехнологический дуализм обозначенной системы высшего уровня и формирующим ее статическое состояние. Вторым компонентом является совокупность промысловых единиц - добывающих судов, осуществляющих промысловую деятельность в таких системах. Причем, первый является определяющим и ограничивающим производственную деятельность по добыче водных биоресурсов [4].

Рыбодобывающий процесс как любой производственный (технологический) процесс

проистекает в определенном временном интервале, связывая между собой промысловые объекты, добывающие суда с соответствующей технологической вооруженностью.

Учитывая факты большой неопределенности и стохастичности процесса добычи водных биоресурсов, наличие неуправляемых или слабо управляемых факторов, оказывающих отрицательное влияние на его ход в реальных условиях промысла, осуществить «правильное» или оптимальное планирование этого процесса с целью достижения плановых объемов добычи с направляющим вектором их повышения без проведения факторного анализа и учета издержек и потерь, возникающих в соответствующих подсистемах названного процесса невозможно.[5]

Структуру издержек и потерь при осуществлении рыбодобывающего процесса составляют некоторые их системы, создающие определенного рода «узкие места» - препятствия (барьеры), которые, в свою очередь, приводят к нарушению целостности и снижению эффективности всей материалопроводящей системы «добыча» и затрудняют построение логистических цепей процесса добычи [4]. Причем, издержки и потери, характеризующие качество ее работы, связанные с нарушением темпа – временные издержки и потери, оказывают существенное негативное влияние на количественные показатели.

В этой связи на первое место выходит планирование и оптимизация рейсооборота

добывающего судна - промыслового рейса как временной составляющей процесса добычи водных биоресурсов.

Исходя из вышесказанного, авторами предлагается научно-обоснованный и практико-ориентированный подход к постановке и решению оптимизационной задачи планирования рейсооборота добывающих судов как первой динамической составляющей рыбодобывающей деятельности на основе учета временных издержек и потерь на всех этапах планирования промыслового рейса на примере добычи командорского кальмара в Северо-Курильской зоне Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна.

1. Постановка задачи оптимизации

В целях определения основных параметров оптимизационной задачи был проведен факторный анализ реальной промысловой деятельности группы добывающих судов, осуществлявших добычу командорского кальмара в Северо-Курильской промысловой зоне в период 2018-2019 гг. на протяжении его промысловой доступности, составляющей 8 месяцев календарного года. В указанном временном интервале на промысле работало порядка 80 единиц добывающего флота 4-ех основных типов с траловой технологией добычи: СТР, СРТМ, БМРТ, РТМ. Каждое судно осуществляло по одному промысловому рейсу, длительность которого составила порядка 140 - 155 суток в зависимости от типа добывающего судна. В результате анализа структуры рейсооборота по каждому типу добывающего судна установлены следующие совокупности временных издержек и потерь:

- производительные потери времени, связанные с непосредственным осуществлением технологических операций по добыче промыслового объекта: поиска – подготовка к постановке и постановка трала – траление – выборка трала – выливка улова;
- непроизводительные потери времени, не связанные напрямую с производственным процессом по добыче промыслового объекта.

Структура и удельный вес временных издержек и потерь в рейсообороте добывающего судна по типам приведены на рис. 1.

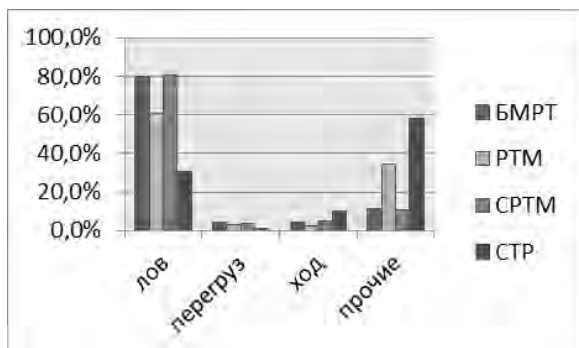


Рис. 1. Структура временных издержек

Удельный вес первых в общем рейсообороте добывающих судов составил порядка 10-25%.

Объемы добычи командорского кальмара в разрезе типового состава добывающих судов представлен на рис. 2.

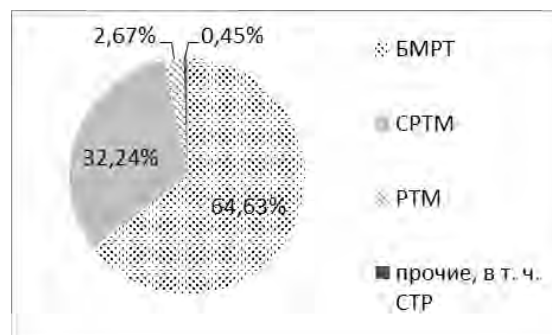


Рис. 2. Структура типового состава флота

Анализ производственной (добывающей) деятельности судов показал, что за весь исследуемый период общий объем добычи всеми судами составил 78 024 т. Наибольший удельный вес по объемам добычи приходится на суда типа БМТ и составляет 64,6%, удельный вес добычи судов типа СРТМ и РТМ составляет 32,2% и 2,7% соответственно. Среднесуточная добыча кальмара командорскими судами типа БМРТ составила 30,4 т, судами типа СРТМ составила 22,4 т, а судами типа РТМ – 17,1 т.

Степень освоения кальмара командорского за период с 2009 по 2019 год представлена на рисунке 3.

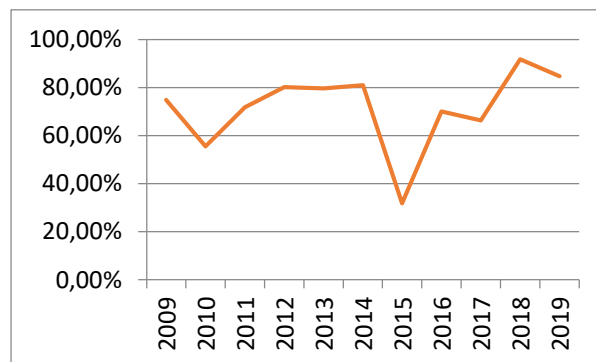


Рис. 3. Динамика освоения ОДУ кальмара командорского

Средняя степень освоения ОДУ кальмара командорского составила 71,27%, наибольшее значение степени освоения ОДУ наблюдалось в 2018 году и составило 91,79%, наименьшее значение степени освоения ОДУ наблюдалось в 2015 году и составило 31,85%. С 2009 по 2014 г объем ОДУ кальмара командорского составлял 70 тыс. т., в 2015 объем ОДУ был увеличен до 85 тыс.т. и далее не менялся.

Таким образом, определено, что для повышения эффективности промысла названного промыслового объекта необходимо произвести учет всех издержек и потерь времени на каждом этапе планирования промыслового рейса с последующей оптимизацией каждого этапа.

2. Алгоритм и методика моделирования

За время промысловой доступности объекта промысла, может быть выполнен один или два рейса. Обозначим N количество рейсов, тогда время промысловой доступности объекта можно представить как $t_{плд} = N \cdot t_{ро}$, где $t_{ро}$ - время рейсооборота промыслового судна. Время

рейсооборота складывается из времени пребывания судна в портах t_n и времени непрерывного пребывания судна в море t_m . Значение t_n определяется нормами пребывания судна в порту и составляет примерно 8-10 дней. Значение так же определяется нормативами для каждого типа судна, а с другой стороны является условно детерминированной величиной, состоящей из времени перехода ($t_{пер}$) и времени нахождения на промысле $t_{пром}$. Таким образом, время промысла на первом этапе определяется по формуле $t_{пром} = t_m - t_{пер}$.

Расчет времени промысла можно представить в виде трех этапов (рис. 4).

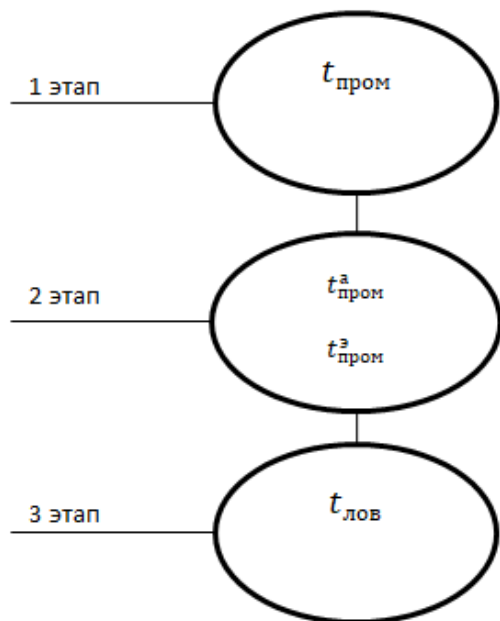


Рис. 4. Этапы расчета времени промысла

Первый этап – этап планирования промыслового времени в общем виде. На этом этапе возникает барьер 1 – потери промыслового времени, например, связанные с переходами между промысловыми подрайонами, промысловыми квадратами, проведением поисковых работ и прочими подобными потерями времени. В это время непосредственного лова не осуществляется, и, следовательно, суточный вылов будет равен нулю.

Начало рыбодобывающей деятельности – приход в район промысла. После прихода судна в район промысла оно может осуществлять поисковые операции $t_{поиск}$ и пробные траления $t_{тр}$.

$\Delta t = t_{поиск} + t_{тр}$ – производственные потери времени, которые входят в промысловое время $t_{пром}$.

Если длительность этих операций не превышает двое суток считаем, что нет непроизводительных потерь. Если время операций превышает двое суток, то возникают непроизводительные потери времени, которые обозначим ε_1 .

Тогда

$$t_{пром1} = (t_{пром} - \Delta t) - \varepsilon_1. \quad (1)$$

Длительность поисковых операций и пробных тралений может быть и менее двух суток, тогда возникает резерв времени $\Delta\theta_1$, который в

последствии может быть использован в других промысловых операциях.

Согласно проведенного анализа потери ε_1 при добычи кальмара командорского в зависимости от типа судна составили от 3 до 10 суток.

Второй этап – этап осуществления производственного процесса по добыче биоресурсов. На этом этапе возникает следующий барьер 2 – непроизводительные потери внутри производственного процесса по добыче. Эти потери находятся в непосредственной зависимости от формы организации промысла.

Добывающее судно может работать в двух формах: в автономном режиме или в экспедиционном. Время нахождения добывающего судна на промысле определяется выбранной формой организации промысла, так для экспедиционного режима работы промысловое время определяется формулой (1), т.е. $t_{пром}^з = (t_{пром} - \Delta t) - \varepsilon_1$. Но в процессе ведения производственной деятельности судно могут возникнуть непроизводительные затраты, связанные с ожиданием перегруза или бункеровки, отсутствием транспортов-перегрузчиков и прочие. Считаем что такие затраты на одну операцию не превышают суток. Все суммарные непроизводительные затраты времени более суток обозначим $\varepsilon_2^з$. Тогда промысловое время судна работающего в экспедиционном режиме равно

$$t_{пром}^з = ((t_{пром} - \Delta t) - \varepsilon_1) - \varepsilon_2^з. \quad (2)$$

При отсутствии или минимальном времени (менее половины суток) непроизводительных затрат возникает резерв времени $\Delta\theta_2^з$.

Промысловое время судна, работающего в автономной форме, определяется по минимуму одного из показателей автономности – периода автономности:

$$t_{период}^a = \min(t_{пром1}^1, t_{пром1}^2, t_{пром1}^3),$$

где $t_{пром1}^1$ – период автономности по запасам топлива, $t_{пром1}^2$ – период автономности по заполнению трюмов по основным видам продукции, $t_{пром1}^3$ – период автономности по сроку хранения продукции.

Период автономности определяет цикличность рыбодобывающей деятельности. Допустим, что один производственный цикл – время заполнения трюма, $t_{пром1}^2$. Количество производственных циклов (забивка) $n_3 = \frac{t_{пром1}^1}{t_{пром1}^2}$. Тогда время на грузовые

операции составит $t_{перег} = n_3 t_{на 1 перег}$, где $t_{на 1 перег}$ запланированное время на один перегруз, от 2 до 4 суток. А промысловое время при работе в автономной форме организации промысла составит $t_{пром}^a = t_{пром1} - n_3 t_{на 1 перег}$.

Аналогичным образом рассчитывается цикличность по запасам топлива или сроку хранения продукции.

Тогда в общем виде промысловое время в автономной форме можно записать следующим образом $t_{пром}^a = t_{пром1} - n_3 t_{опер}$, где $t_{опер}$ это время проведения операций автономности. Для судов с законченным производственным циклом значение $t_{пром1}^3$ при расчете времени промысла не учитывается, т.к. в этом случае срок хранения продукции не ограничен.

Если $t_{\text{опер}} \geq 4$ суток, то возникают непроизводительные потери времени (задержка перегруза), обозначим их ε_2 . Тогда и $t_{\text{пром}}^a$ тоже уменьшается, следовательно уменьшается и ожидаемый вылов.

Суммарное потерянное время за все операции автономности обозначим ε_2^a .

Тогда промысловое время при работе в автономной форме выражается

$$t_{\text{пром}}^a = (t_{\text{пром1}} - n_3 t_{\text{опер}}) - \varepsilon_2^a \quad (3)$$

При выполнении операций автономности менее чем за 4 суток возникает резерв времени $\Delta\theta_2^a$.

Согласно проведенного анализа потери ε_2 при добычи кальмара командорского в зависимости от типа судна составили от 8 до 21 суток.

На третьем этапе – этапе осуществления непосредственных производственных циклов, формирующих суточный режим работы – количество технологических циклов и их длительность, возникают внутрипроизводственные потери времени при проведении каждой технологической операции. Например, при использовании траловой технологической добычи выполняется технологическая цепочка: оперативный поиск – подготовка к постановке и постановка трала – траление – выборка трала – выливка улова. В общем случае длительность названного технологического процесса состоит из длительности и количества проведенных циклов $t_{\text{пци}}$. Время проведения одного производственно цикла $t_{\text{ц}} = \sum(t_{\text{пци}} + t_{\text{пни}})$, где $t_{\text{пци}}$ время операции производственного цикла, а $t_{\text{пни}}$ – производственные потери на производственном цикле. Кроме производственных потерь возникают непроизводительные потери: метеоусловия, потеря орудия лова, ремонтные работы, нестабильная промысловая обстановка, аварии и т.д. В случае возникновения этих потерь производственный цикл по добыче становится больше 1 суток. Обозначим эти потери ε_3 . Описанные выше потери времени ε_1 и $\xi\varepsilon_2$ выражены в сутках, а потери ε_3 это доля суток, т.е. время одного цикла будет равно $t_{\text{ц}}\varepsilon_3 = \varepsilon_3 \sum(t_{\text{пци}} + t_{\text{пни}})$. За сутки выполняется $n_{\text{ц}}$ производственных циклов, время проведения операций лова внутри суток составляет $t_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3$.

Тогда промысловое время (2) с учетом суточных производственных циклов составит

$$t_{\text{пром}}^a = t_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3 \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon_1 - n_3 t_{\text{опер}} \right) - \varepsilon_2^a$$

для автономной формы организации промысла,

$$t_{\text{пром}}^a = t_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3 \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon_1 \right) - \varepsilon_2^a$$

для экспедиционной формы организации промысла.

Причем, при определенных благоприятных условиях осуществления производственных операций в течении суток, связанных с отрегулированной цикличностью может появиться временной интервал $\Delta\theta_3$ для выполнения «дополнительного» цикла. Его можно отнести к резерву времени или запасу времени.

Согласно проведенного анализа потери ε_3 при добычи кальмара командорского в зависимости от типа судна составили от 3 до 5 суток.

Таким образом, время рейсообразота в зависимости от формы организации промысла описывается следующей моделью

$$t_{\text{ро}} = t_{\text{порт}} + t_{\text{переход}} + t_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3 \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon_1 - n_3 t_{\text{опер}} \right) - \varepsilon_2^a$$

$$t_{\text{ро}} = t_{\text{порт}} + t_{\text{переход}} + t_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3 \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon_1 \right) - \varepsilon_2^a$$

Если $q_{\text{ц}}$ – объем добычи за один производственный цикл, $n_{\text{ц}}$ – количество производственных циклов тогда вылов за сутки составит $a_{\text{сут}} = q_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3$.

Объем добычи при автономной форме организации промысла равен $A_{\text{пром}}^a = (q_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3) \left((t_{\text{пром1}} - n_3 t_{\text{опер}}) - \varepsilon_2^a \right)$.

Объем добычи при экспедиционной форме организации промысла будет равен $A_{\text{пром}}^a = (q_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3) (t_{\text{пром1}} - \varepsilon_2^a)$.

А объем добычи за весь рейс составит

$$A_{\text{пром}}^a = (q_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3) \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon - n_3 t_{\text{опер}} \right) - \varepsilon_2^a$$

$$\text{или } A_{\text{пром}}^a = (q_{\text{ц}}n_{\text{ц}}\varepsilon_3) \left((t_{\text{пром}} - \Delta t) - \varepsilon_1 - \varepsilon_2^a \right)$$

Система управления промысловым временем может быть описана как система их трех шагов, соответствующих описанным барьерам. На каждом шаге система определяется набором чисел $\xi_k = (\xi_1^k, \xi_2^k, \xi_3^k)$, которые соответствуют некоторым состояниям системы, полученным в результате воздействия управления u_k . В данном случае под управлением понимается принятие стратегических, оперативных и тактических управленческих решений. Считаем, что при переходе системы из состояния ξ_{k-1} в состояние ξ_k под воздействием управления u_k состояние ξ_k зависит от предыдущего состояния и не зависит от процесса перехода в это состояние.

При реализации шага k появляется «резерв» зависящий от исходного состояния и выбранного управления $\Delta A_k = \varphi_k(\xi_k, u_k)$, тогда общий резерв составит $\Delta A = \sum_{k=1}^3 \varphi_k(\xi_k, u_k)$.

В поставленной задаче требуется найти такие управления u_1, u_2, u_3 , чтобы значение функционала $\Delta A = \sum_{k=1}^3 \varphi_k(\xi_k, u_k)$ было максимальным.

Изначально система находится в некотором состоянии $\xi_3 = (\xi_1^3, \xi_2^3, \xi_3^3)$, где ξ_1^3 состояние в котором присутствуют потери времени I-го барьера, ξ_2^3 состояние в котором присутствуют потери времени II-го барьера, ξ_3^3 состояние в котором присутствуют потери времени III-го барьера.

Оптимизация начинается с третьего этапа, т.е. с оптимизации времени соответствующему третьему барьеру потерь времени.

Необходимо найти такое управление u_3 , которое переведет систему в состояние $\xi_2 = (\xi_1^2, \xi_2^2, \theta_3)$, где ξ_1^2 и ξ_2^2 - состояния, в которых присутствуют потери времени I-го и II-го барьеров, а θ_3 - состояние, в котором оптимизировано время III-го барьера. При этом достигается максимум функции $\varphi_3(\xi_2, u_3)$, т.е. $\Delta A_3 = \max_{u_3} \varphi_3(\xi_2, u_3)$.

Следующий этап это оптимизация времени производственного процесса по добыче. Идет поиск управление u_2 , которое переведет систему в состояние $\xi_1 = (\xi_1^1, \theta_2, \theta_3)$, где ξ_1^1 - состояние, в котором присутствуют потери времени I-го барьера, а θ_2, θ_3 - состояния, в которых оптимизировано время II-го и III-го барьеров. Оптимизация ведется с учетом найденного ранее оптимального состояния для III-го барьера. При этом достигается максимум функции $\varphi_2(\xi_1, u_2)$, т.е. $\Delta A_2 = \max_{u_2} \{\Delta A_3 + \varphi_2(\xi_1, u_2)\}$.

Последний этап это оптимизация промыслового времени. Идет поиск управление u_1 , которое переведет систему в состояние $\xi_0 = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, в котором оптимизировано время всех трех барьеров. При этом достигается максимум функции $\varphi_1(\xi_0, u_1)$, т.е. $\Delta A_1 = \max_{u_1} \{\Delta A_2 + \varphi_1(\xi_0, u_1)\}$.

Полученное значение ΔA_1 включает в себя ΔA_2 и ΔA_3 и является оптимальным.

Таким образом, имеет место задача динамического программирования, решение которой следующее:

$$\Delta A_3 = \max_{u_3} \varphi_3(\xi_2, u_3)$$

$$\Delta A_2 = \max_{u_2} \{\Delta A_3 + \varphi_2(\xi_1, u_2)\}$$

$$\Delta A_1 = \max_{u_1} \{\Delta A_2 + \varphi_1(\xi_0, u_1)\}.$$

Алгоритм расчета необходимого количества судов на основе промысловой доступности объекта и типа выбранного судна был предложен в [4]. С учетом вышеописанного процесса учета временных издержек в алгоритм добавляется блок корректировки времени фактического лова, который учитывает возможные временные издержки (рис. 5).

Оптимизация проводится пошагово:

Шаг 1: расчет промыслового времени судна работающего в автономной форме организации промысла.

Шаг 2: расчет промыслового времени судна работающего в экспедиционной форме организации промысла.

Шаг 3: расчет ожидаемого (запланированного) объема вылова по каждой форме с учетом оптимизации внутрипроизводственных процессов добычи (на основании решения задачи динамического программирования).

Шаг 4: определение состава флота по формам организации промысла с минимизацией потерь времени (максимизацией вылова).

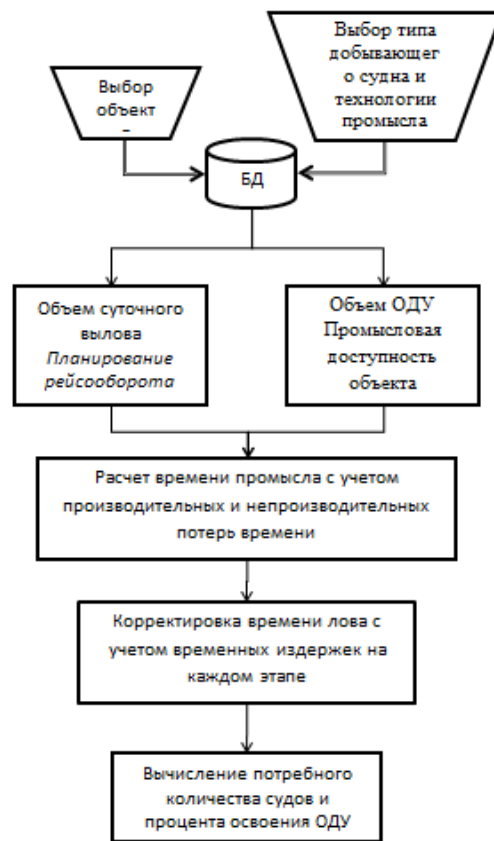


Рис. 5. Алгоритм расчета потребного количества судов и процента освоения ОДУ

Результат оптимизации определения потребного количества судов представлен в виде таблицы тип судна – количество судов – ожидаемый вылов. Для примера был выполнен расчет потребного количества судов для освоения ОДУ кальмара командорского. Результат расчета представлен в таблице 1.

Таблица 1

Пример результатов расчета для одного объекта

Тип добывающего судна и технология промысла	Потребное кол-во судов	Ожидаемый вылов, тыс. т.
БМРТ-- Разноглубинный трал	2	7,52
СРТМ-- Разноглубинный трал	21	69,61
РТМ--Разноглубинный трал	3	7,45

Полученный результат расчетов показал что для освоения ОДУ необходимо 26 судов, которые будут вести добычу кальмара командорского в течении одного рейса. В этом случае общий суммарный вылов составит 84,58 тыс. т., т.е. процент освоения ОДУ составит 99,51%.

Заключение

Если в дальнейшем управление системой будет нацелено на создание экспедиций по добыче кальмара командорского, то временные издержки будут стремиться к минимуму, т.к. будут задействованы обрабатывающие суда.

1. Литература

1. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Моделирование процессов ведения рыбодобывающей деятельности в многовидовой промысловой системе "промысловая зона рыбохозяйственного бассейна" при статической постановке оптимизационной задачи (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 3-1 (49). С. 253-259.
2. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
3. Лисиенко С. В. Концептуальный подход к совершенствованию организации ведения добычи водных биологических ресурсов в контексте развития общей теории промышленного рыболовства (на примере Дальневосточного региона) // Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2014. № 1. с.18-28.
4. Лисиенко С.В., Иванко Н.С. Оптимизация рыбодобывающей деятельности в многовидовых промысловых системах - промысловых зонах в статическом их состоянии с учетом биотехнологического дуализма (на примере Северо-Курильской зоны Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 230-237.
5. Лисиенко С. В. О многовидовом рыболовстве в контексте совершенствования системной организации промысла ВБР // Рыбное хозяйство, 2013. - № 4. – с. 34-41.
6. Мойсеенко С. С., Мейлер Л. Е. Рыбопромышленная логистика. Монография/Калининград.: изд-во БГРАФ, 2016. – 174 с.
7. Мельников В.Н., Мельников А. В. Совершенствование общей теории промышленного рыболовства //Вестник АГТУ. Сер.: Рыб. хоз-во. 2010. № 1. с.42-53.
8. Мойсеенко С. С., Мороз Е. О. Оптимизация системы транспортного обслуживания рыболовных судов // Морские интеллектуальные технологии, № 4(42), т. 3, 2018, с.168-176.
9. Лисиенко С. В. Совершенствование организации ведения добычи водных биологических ресурсов с целью успешной реализации стратегического развития отечественного рыболовства // Рыбное хозяйство, № 3, 2013 г. с. 17-21.

References

1. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Modelirovanie protsessov vedeniya rybdobovyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovoy promyslovoy sisteme "promyslovaya zona rybokhozyaystvennogo basseyna" pri staticheskoy postanovke optimizatsionnoy zadachi (na primere Severo-Kuril'skoy zony Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna) [Modeling of the processes of conducting fishing activities in the multi-species fishing system "fishing zone of the fishing basin" in the static formulation of the optimization problem (on the example of the North Kuril zone of the Far Eastern fishing basin)] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 253-259.
2. Andreev M. N., Studenetskiy S. A. Optimal'noe upravlenie na promysle [Optimal management in the field]. – M.: Pishchevaya promyshlennost', 1975. – 288 s.
3. Lisienko S. V. Kontseptual'nyy podkhod k sovershenstvovaniyu organizatsii vedeniya dobychi vodnykh biologicheskikh resursov v kontekste razvitiya obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva (na primere Dal'nevostochnogo regiona) [A conceptual approach to improving the organization of the production of aquatic biological resources in the context of the development of the general theory of industrial fishing (on the example of the Far Eastern region)] // Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo. 2014. № 1. s.18-28.
4. Lisienko S.V., Ivanko N.S. Optimizatsiya rybdobovyvayushchey deyatel'nosti v mnogovidovykh promyslovyykh sistemakh - promyslovyykh zonakh v staticheskom ikh sostoyanii s uchetom biotekhnologicheskogo dualizma (na primere Severo-Kuril'skoy zony Dal'nevostochnogo rybokhozyaystvennogo basseyna) [Optimization of fishing activity in multi-species fishing systems-fishing zones in their static state, taking into account biotechnological dualism (on the example of the North-Kuril zone of the Far Eastern fisheries basin)] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-1 (50). S. 230-237.
5. Lisienko S. V. O mnogovidovom rybolovstve v kontekste sovershenstvovaniya sistemnoy organizatsii promysla VBR [On multi-species fishing in the context of improving the system organization of fishing in the WBR]// Rybnoe khozyaystvo, 2013. - № 4. – s. 34-41.
6. Moyseenko S. S., Meyler L. E. Rybopromyshlennaya logistika. Monografiya/Kaliningrad.: izd-vo BGRAF, 2016. – 174 s.
7. Mel'nikov V.N., Mel'nikov A. V. Sovershenstvovanie obshchey teorii promyshlennogo rybolovstva //Vestnik AGTU. Ser.: Ryb. khoz-vo. 2010. № 1. s.42-53.
8. Moyseenko S. S., Moroz E. O. Optimizatsiya sistemy transportnogo obsluzhivaniya rybolovnykh sudov // Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 4(42), t. 3, 2018, s.168-176.
9. Lisienko S. V. Sovershenstvovanie organizatsii vedeniya dobychi vodnykh biologicheskikh resursov s tsel'yu uspeshnoy realizatsii strategicheskogo razvitiya otechestvennogo rybolovstva // Rybnoe khozyaystvo, № 3, 2013 g. s. 17-21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Светлана Владимировна Лисиенко, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Svetlana V. Lisienko, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries, Far Eastern state technical fishery University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: lisienkosv@mail.ru

Нина Сергеевна Иванко, аспирант кафедры промышленного рыболовства, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52Б e-mail: invs@mail.ru

Nina S. Ivanko, graduate student of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B e-mail: invs@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.03.2021

Принята к публикации: 15.05.2021



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

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

e-mail: mit-journal@mail.ru <http://morintex.ru>

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов:

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) 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 с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И.

Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А.В., Рыбников Н.И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**