

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101

ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010101000011100110010011100010110100100100

0011010100110100100001011010010101000100100011111100110011001101101011001110000001110010100101

11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010

00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

1100110001110010011000101001010011110101010100001010101000110101110011001000111001010010010100

00101001110011010011110001010010101110101001000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 4 (50) T.2 2020
№ 4 part 2 2020



Труды VIII МЕЖДУНАРОДНОГО БАЛТИЙСКОГО МОРСКОГО ФОРУМА



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 том 2 2020 Сквозной номер 50

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

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

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

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

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

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

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

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

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

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

бесплатный звонок по России 8 800 201 3897

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова

© ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ», 2020



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 part 2 2020 www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Frequency of publication - 4 issues per year.

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

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

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

Journal headings:

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

The journal is coming since 2008

Publication frequency — 4 issues per year

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

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

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

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

Member of Association of science editors and publishers.

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

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova

© RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd, 2020



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

www.morintex.ru

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

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

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

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



ISSN 2073-7173
ISSN 2588-0233

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

www.morintex.ru

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor

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

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

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

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

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

Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Co-chairmen

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

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

Council Members

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

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

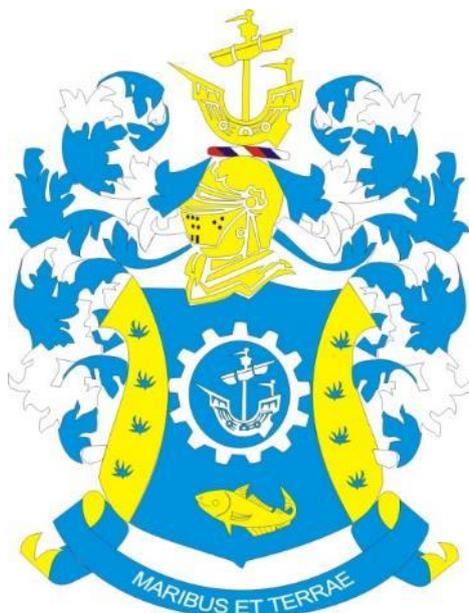
Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

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

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

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





**Калининградский государственный технический
университет**

**Труды
VIII Международного
Балтийского морского форума**

Kaliningrad State Technical University

**Proceedings
VIII International Baltic Maritime Forum**

СОДЕРЖАНИЕ	стр
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Корзин М.М., Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н., Ванюшкина К.С., Лукин И.Ю., Сивкова А.А. Особенности взаимодействия бюро проектант – верфь и перспективы развития в контексте цифровой трансформации производства.....	11
Кузнецов С.Е., Алексеев Н.А., Виноградов А.А. Определение надежности электроснабжения судовых ответственных приемников электроэнергии.....	22
Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А. Устранение причин электрохимической коррозии обшивок судов.....	27
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Харитонов М.С., Никишин А.Ю., Кажекин И.Е. Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения морских устьевых портов.....	32
Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Определение расходных характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми осесимметричными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин.....	39
Чехранов С.В., Симашов Р.Р. Экспериментальное исследование структуры газового потока в криволинейных каналах переменного сечения.....	44
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	
Кажекин И.Е. Исследование переходных процессов при однофазных повреждениях изоляции в низковольтных судовых электросетях с учетом сопротивления в месте замыкания.....	49
Белей В.Ф., Харитонов М.С., Брижак Р.О. Рекомендации по обеспечению качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах.....	55
ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ	
Бондарев В.А., Волкогон В.А., Нечаев Ю.И., Рагулина И.Р. Концепция управления безэкипажными судами.....	62
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Поляков Р.К., Кузьминов К.Г., Тристанов А.Б. Выбор архитектуры семантической сегментации изображений для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения.....	68
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ	
Сердобинцев С.П., Будченко Н.С., Долгий Н.А. Автоматизация контроля и управления производством рыбных консервов повышенной безопасности.....	76
Мойсеенко С.С., Грунтов А.В. Методика расчета агрегированной величины совокупных рисков в работе рыбопромыслового флота.....	81
УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	
Яфасов А.Я., Меркулов А.А., Поляков Р.К., Майтаков Ф.Г. Экосистема рыбной отрасли в цифровой экономике.....	85
Яфасов А.Я., Поляков Р.К. Национальный инжиниринговый центр рыбной отрасли России.....	96
Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г. Прогнозирование электропотребления объектов социально-экономических систем на основе значений ранговой нормы.....	107
Зайцев А.А., Зайцева А.А., Полещук Н.К. Управление устойчивостью будущих морских специалистов к укачиванию.....	112
Мнацаканян Р.А. Особенности социального дисконтирования в проектах государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе.....	118
Луценко Д.В. Методика составления плана повышения энергетической эффективности припортового регионального электротехнического комплекса.....	125

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

Настин Ю.Я. Исследование и моделирование оперативного планирования грузовых операций в морском порту..... 130

Медведев В.В., Колин А.Д. Системный анализ математического моделирования теплопроводности нейтрального газа верхней атмосферы земли..... 136

Наумов В.А., Великанов Н.Л., Тришина А.В. Нагрузочные характеристики трехплунжерных насосов для пожаротушения распыленной морской водой..... 142

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Великанов Н.Л., Шарков О.В. Математическая модель погружения нижней подборы кошелькового невода на рабочую глубину..... 147

Тихонов Е.А., Григорьев И.В., Базыкин В.И., Шубин А.А. Численное моделирование волнового и ветрового воздействия на систему якорения садкового модуля для выращивания рыбы в морских акваториях..... 153

CONTENTS	page
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Maksim M. Korzin, Pavel G. Zobov, Alexander V. Dektyarev, Vladimir N. Morozov, Ksenia S. Vanyushkina, Il'ya Yu. Lukin, Arina A. Sivkova Peculiarities of interaction between bureau designer and shipyard and development prospects in the context of digital transformation of production...	11
Sergey E. Kuznetsov, Nikolay A. Alekseev, Andrey A. Vinogradov Determination of reliability of power supply of ship's responsible power receivers.....	22
Valery I. Verevkin, Valery F. Igushev, Svetlana A. Teryusheva Electrochemical reasons corrosion of shield skins.....	27
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Maxim S. Kharitonov, Andrey Y. Nikishin, Ilya E. Kazhekin Problems of renewable energy sources integration in estuary marine ports power supply systems.....	32
Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov Determination of mass flow characteristics of supersonic axisymmetric nozzle diaphragms in modeling variable duties of low-consumption turbines.....	39
Sergei V. Chekhranov, Rafail R. Simashov Experimental study of the structure of a gas flow in curvilinear channels of variable cross-section.....	44
PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION	
Ilya E. Kazhekin Research of transient processes in case of single-phase insulation faults in low-voltage ship power grids, taking into account the resistance at the fault point.....	49
Valeriy F. Beley, Maxim S. Kharitonov, Roman O. Brizhak Power quality improvement recommendations for shipboard power systems.....	55
INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS	
Vitaly A. Bondarev, Vladimir A. Volkogon, Yuri I. Nechaev, Izumrud R. Ragulina Unmanned vessel management concept.....	62
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Ruslan K. Polyakov, Konstantin G. Kuzminov, Alexander B. Tristanov The choice of semantic architecture segmentation of images for the prototype of a self-learning software and hardware complex of technical vision.....	68
AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS	
Stanislav P. Serdobintsev, Natalia S. Budchenko, Nikolay D. Dolgiy Automation of control and management of enhanced safety canned fish production.....	76
Sergej S. Moyseenko, Aleksandr V. Gruntov Calculation procedure of the aggregated value of total risks in the work of the fishing fleet.....	81
CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS	
Abdurashid Y. Yafasov, Aleksandr A. Merkulov, Ruslan K. Polyakov, Fedor G. Maitakov Ecosystem of the fishing industry in the digital economy.....	85
Abdurashid Y. Yafasov, Ruslan K. Polyakov National engineering center of the fishing industry of Russia.....	96
Victor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun, Dmitry G. Morozov Forecasting the power consumption of objects of socio-economic systems based on the values of the rank norm.....	107
Anatoly A. Zaitsev, Aleksandra A. Zaitseva, Nadegda K. Poleshchuk Managing the resilience of future marine specialists to sickness.....	112
Robert A. Mnatsakanyan Features of social discounting in public-private partnership projects in fisheries.....	118
Dmitry V. Lutsenko Method of developing an increase plan energy efficiency of the portal regional electrotechnical complex.....	125

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE

Yurii Ya. Nastin Research and modeling of operational planning of cargo operations in the sea port.....	130
Vladimir V. Medvedev, Anton D. Kolin System analysis of mathematical modeling of the thermal conductivity of the neutral gas of the upper atmosphere of the earth.....	136
Vladimir A. Naumov, Nikolay L. Velikanov, Anzhelika V. Trishina Load characteristics of three-plunger pumps for spray seawater fire fighting.....	142

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov Mathematical model of immersion of the purse seine bottom rope to the working depth.....	147
Evgenii A. Tihonov, Igor V. Grigorev, Valentin I. Bazyikin, Andrey A. Shubin Numerical simulation of wave and wind effects on the anchoring system of a cage module for growing fish in marine areas.....	153

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 05.13.18

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.066

Особенности взаимодействия бюро проектант – верфь и перспективы развития в контексте цифровой трансформации производства

М.М. Корзин¹, П.Г. Зобов², А.В. Дектярев³, В.Н. Морозов³, К.С. Ванюшкина², И.Ю. Лукин², А.А. Сивкова²
¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ²Институт судостроения и морской Арктической техники, ³Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Мировое судостроительное сообщество продолжает осваивать цифровые экосистемы в контексте Индустрии 4.0. Функционирующие экосистемы, в свою очередь, являются неременным атрибутом цифровизации. Рост интереса к экосистемам объясняется появлением технологий, дающих возможности взаимодействия участников бизнес-процессов в рамках их деятельности, а также практически мгновенному предоставлению заинтересованным сторонам необходимой информации (цифровой двойник, большие данные и пр.). Для широкого внедрения технологий Индустрии 4.0 все еще необходимо решить множество частных задач, которые отражают узконаправленные вопросы ограничений и применимости технологий относительно судостроения, а также спектр вопросов правового регулирования, стандартизации и сертификации. С одной стороны, такой инструмент как 3D-моделирование, который является одним из ключевых моментов цифровизации производства, давно используется в судостроении, но в виде вспомогательных средств проектирования. Целью данной работы является анализ проблем существующего взаимодействия между конструкторскими бюро и судостроительными заводами в организации цифровой трансформации производства. Выявлены и рассмотрены основные причины возникающих проблем, такие как отсутствие централизованного подхода к взаимодействию, отсутствие на отраслевом уровне решения о главенстве 3D-модели над бумажным документом, разнородность применяемых систем автоматизированного проектирования, неготовность промышленных участков использовать информацию 3D-модели в полном объеме и другие аспекты взаимодействия и методы их решения. Предложены новые решения по составу поставляемой документации и в части взаимодействия участников данного процесса со стороны конструкторских бюро и судостроительных заводов.

Ключевые слова: Судостроительное производство, проектант - верфь, завод - исполнитель, конструкторское бюро, АО «ОСК», цифровизация, 3D-модель.

Peculiarities of interaction between bureau designer and shipyard and development prospects in the context of digital transformation of production

Maksim M. Korzin¹, Pavel G. Zobov², Alexander V. Dektyarev³, Vladimir N. Morozov³,
Ksenia S. Vanyushkina², Il'ya Yu. Lukin², Arina A. Sivkova²

¹Saint Petersburg State Marine Technical University, Russian Federation ²Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Engineering, Russian Federation ³Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The global shipbuilding community continues to embrace digital ecosystems in the context of Industry 4.0. Functioning ecosystems, in turn, are an indispensable attribute of digitalization. The growth of interest in ecosystems is explained by the emergence of technologies that enable interaction between participants in business processes within the framework of their activities, as well as the almost instant provision of the necessary information to interested parties (digital twin, big data, etc.). For the widespread adoption of Industry 4.0 technologies, it is still necessary to solve many particular problems, which reflect narrowly focused issues of limitations and applicability of technologies in relation to shipbuilding, as well as a range of issues of legal regulation, standardization and certification. On the one hand, a tool such as 3D modeling, which is one of the key points of digitalization of production, has long been used in shipbuilding, but in the form of design aids. The purpose of this work is to analyze the problems of the existing interaction between design bureaus and shipyards in organizing the digital transformation of production. The main reasons for the emerging problems are identified and considered, such as the lack of a centralized approach to interaction, the absence at the industry level of a decision on the dominance of the 3D model over the paper document, the heterogeneity of the CAD systems used, the unavailability of industrial sites to use the information of the 3D model in full, etc. aspects of interaction and methods of their solution. New solutions are proposed for the composition of the supplied documentation and in terms of interaction between the participants in this process from the side of design bureaus and shipyards.

Keywords: Shipbuilding, designer - shipyard, plant - contractor, design bureau, JSC "United Shipbuilding Corporation", digitalization, 3D model.

Введение

На сегодняшний день в российской судостроительной отрасли не существует четкого регламента взаимодействия между конструкторскими бюро (КБ) и судостроительными заводами (ССЗ) [1, 2]. Каждый раз взаимодействие налаживается по индивидуальному пути, и даже при

одних и тех же участниках процесса может отличаться в зависимости от проекта. Главной проблемой существующей организации работы между КБ и верфью является то, что большинство передаваемых 3D-моделей на ССЗ – справочные, и КБ не вносят в модель изменения, которые появляются в процессе строительства, и не корректируют их (рисунок 1). При необходимости

использования информации модели специалистам ССЗ приходится самим вносить в модель все изменения [1].



Рис. 1. Действующая схема взаимодействия

Данная проблема возникает из-за того, что все еще существует главенство бумажного документа над электронной моделью. В связи с этим КБ в первую очередь корректируют РКД, зачастую забывая делать корректировку модели [3]. Отсутствие на большинстве заказов актуализируемой проектной 3D-модели сегодня делает невозможным полноценное создание рабочей 3D-модели и внедрение ее в стадии подготовки производства и строительства заказов.

1. Опыт аэрокосмической отрасли

Проблема взаимодействия КБ и производства является типовой в российской промышленности, так

как существующая система взаимодействия была унаследована от СССР и предполагает работу одного КБ на несколько предприятий-изготовителей. Разница между ними - в экономическом состоянии, разных путях и методах перевооружения производства, отсутствии передачи информации проектиранту о текущем состоянии парка оборудования. Все это приводит к нестыковкам при попытках изготовления изделий по подготовленной РКД. Предприятия аэрокосмической отрасли, в частности НПО «Энергия», идут по пути создания единого сквозного цикла проектирования на основе САПР, который предполагает передачу всей информации о станочном парке производства в КБ. Высокоавтоматизированное производство с ЧПУ-станками существенно сокращает объем технологической документации, основную роль в которой представляют управляющие программы ЧПУ станков. В итоге, в модели НПО «Энергия» вся конструкторско-технологическая работа была передана бюро-проектанту, на предприятие поступило уже полностью готовая РКД с полностью подготовленными файлами 3D моделей и управляющими программами ЧПУ станков [1]. Схема работ приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Пример реализации взаимодействия бюро-производство с полным циклом выпуска РКД на стороне бюро

Применение такой модели в судостроении представляется затруднительным по следующим причинам:

1) большие объемы требуемого РКД и специфика проектирования судов не позволяют бюро выпустить полный пакет РКД до начала строительства судна, по существующей практике процессы строительства и завершения проектирования идут параллельно;

2) высокая доля неавтоматизированных работ приводит к росту количества изменений в технологической документации и менее предсказуема, чем работа ЧПУ станков;

3) ряд сварочных работ и специфика технологии сборки корпусных конструкций на сегодняшний день не может быть рассчитана в существующих САПР. Требуется работа группы специалистов-технологов над каждой конкретной секцией, расчеты в которой разнятся от факторов, учет которых со стороны бюро затруднителен (например, состояние и химические пробы каждой конкретной партии сварочных электродов).

Перечисленные факторы говорят о том, что применение опыта аэрокосмической отрасли в судостроении возможно лишь частично, а передача всех конструкторских и технологических работ в

бюро отрицательно скажется на экономической эффективности производства.

2. Зарубежный опыт и его применимость в России

На сегодняшний день существуют примеры внедрения описываемой концепции на зарубежных предприятиях. Опыт Японии и США показывает возможность внедрения трехмерной модели как базиса РКД путем построения так называемой CIM (Computer Integrated Manufacturing) структуры взаимодействия. CIM представляет собой комплексный подход, включающий в себя как изменение взаимодействия бюро проектанта и производства, так и изменение взаимодействия процессов внутри предприятия. Рассмотрим внедренную CIM на примере IHIMU (IH Marine United Inc.), рисунок 3 [4].

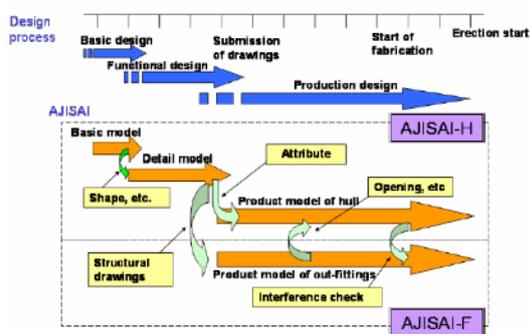


Рис. 3. Структура CIM на примере IHIMU

В данной модели идет разделение проектирования на несколько этапов. Проектант выполняет первые этапы, далее идет подготовка технологических трехмерных моделей специалистами предприятия. Все работы проходят в единой САПР системе, сочетающей функции трехмерного моделирования, моделирования механики, сложных поверхностей, трассировки и т.д. Используется специально разработанный продукт – система AJISAI, но существуют и примеры на базе доступных к покупке САПР, таких как Foran, Aveva и подобных [5]. Когда вопрос проектирования и моделирования конструкции решен, производится ряд технологических симуляций погрузки оборудования, перемещения модулей, раскрытия корпусных конструкций, по завершении симуляций выпускается соответствующая технологическая документация. Такие симуляции проводятся именно специалистами предприятия-изготовителя заказов. Полученные в итоге трехмерные модели уходят на подготовку управляющих программ ЧПУ, подготовку сборочных чертежей и схем. В процессе постройки проводится актуализация модели на базе данных лазерного сканирования и контроль готовности и логистики по средствам RFID меток [6]. В общем виде процесс можно представить следующим образом:

1) создание базовой трехмерной модели (бюро-проектант) и предоставление модели заказчику, проведение базовых симуляций статике, динамики, общей прочности;

2) создание детализированной трехмерной модели (бюро-проектант) и передача детализированной модели заводу-строителю;

3) проведение симуляций сборки, погрузки оборудования, технологических симуляций (специалисты завода-строителя);

4) подготовка технологической документации, управляющих программ ЧПУ (специалисты завода-строителя);

5) актуализация модели в процессе строительства, сопровождение производства и контроль по средствам сканирования и RFID (специалисты завода-строителя).

Надо отметить, что в зарубежном опыте понятие «утверждения изменений» отсутствует как факт. Специалисты КБ и ССЗ работают на равных правах, а доступ к модели организован равнозначным для всех участников процесса. Таким образом достигается максимальная эффективность и скорость подготовки РКД.

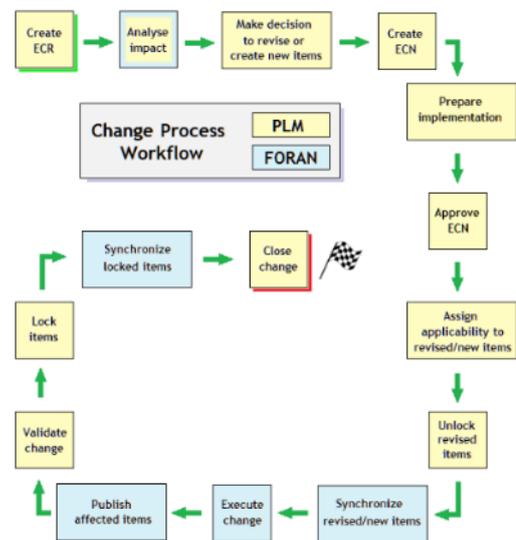


Рис. 4. Алгоритм работы на базе решений Foran

Из схемы на рисунке 4 видно, что решения принимаются в цифровом виде и напрямую интегрированы с PLM системой предприятия [6]. Такой подход позволяет увязать разработку РКД, корректировки, актуализацию и работу с оборудованием и логистикой в единую комплексную систему, описывающую полный процесс постройки заказа. Анализируя приведенные примеры зарубежного опыта, следует выделить ряд положительных черт:

1) работа над заказом рассматривается как комплексный процесс от эскизного проектирования до утилизации;

2) построена четкая логическая цепочка работы и передачи работы над трехмерной моделью, основанная на возможностях и структуре существующего ПО (пример Foran), либо разработанного специализированного ПО описывающего существующий цикл и структуру текущих взаимодействий (AJISAI);

3) работа с моделью производится с постоянным доступом и единством файлов для всех участников процесса через доступ на сервер;

4) широко применяются ЧПУ станки, сокращающие сроки подготовки РКД;

5) сетевой доступ позволяет комплексно оценивать данные актуализации модели.

Исходя из приведенных выше особенностей, можно начать формировать основные подходы к созданию концепции аналога СИМ в рамках Российской судостроительной отрасли. Основные векторы работы заключаются в принятии трехмерной модели как базового рабочего объекта для всех специалистов, интеграция системы утверждений, подписей и согласований в среду разработки, оперативный доступ к проектным данным для всех участников процесса и увеличение интеграции современного ЧПУ оборудования в процесс постройки заказа.

3. Роль цифровой модели в судостроительном производстве

С целью изменения сложившегося подхода необходимо нормативно закрепить положение 3D-модели. Она должна являться основой РКД, а не вспомогательным приложением. Несколько КБ России уже проектируют новые заказы на основе 3D-модели, создают ассоциативные чертежи (рисунок 5). Завод-строитель получает от проектанта модель и чертеж.

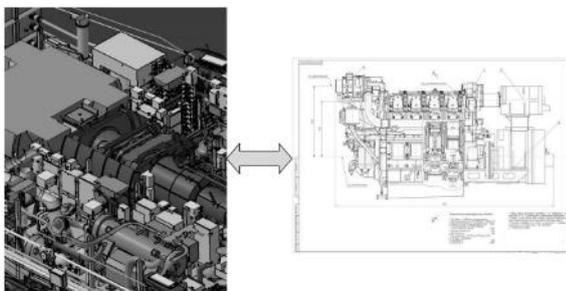


Рис. 5. Ассоциативная связь модели и чертежа

Здесь возникает новая проблема, связанная с отсутствием в отрасли единой системы автоматизированного проектирования. Проектанту и заводу часто приходится подстраиваться друг под друга в части использования единой САПР, либо находить иные пути передачи данных между различными программами. Зачастую перевод модели из одной САПР в другую происходит с искажением графической или текстовой информации, либо даже полной потери части данных [7]. Таким образом, на сегодняшний день необходимо решить проблему передачи электронной модели от проектанта на завод-строитель. Это можно сделать за счет внедрения единой САПР во всей судостроительной отрасли, либо необходимо применять универсальный механизм конвертации, позволяющий избежать потери данных [6-8]. Внедрение единой САПР для всех отраслевых предприятий в настоящее время не является целесообразным по нескольким причинам:

1) стоимость САПР верхнего уровня довольно высока (от 500 тыс. до 1.5 млн. за лицензию на 1 рабочее место);

2) наличие определенной специфики в работах как ЦКБ, так и заводов, которые не учтены в САПР, различия в технологических подходах к процессам проектирования подготовки производства и строительства заказов;

3) отсутствие отечественной тяжелой САПР, специализирующейся на проектировании судовых конструкций.

Сегодня проблема передачи информации между САПР в России решается созданием интегрированной инженерной программной платформы (проект «Гербарий»), которая позволит переводить модели из формата в формат без потери данных [8]. Вопрос о переносе модели из одной САПР в другую на текущий момент находится в процессе решения и в ближайшее время можно надеяться на положительное решение. Начала подниматься тема разработки российской системы автоматизированного проектирования для судостроения. При разработке данной САПР должны учитываться особенности работы отечественной судостроительной отрасли. Другим направлением решения вопроса является доработка существующих САПР специализированными модулями. Такие работы ведутся компанией «Аскон» на основе САПР «Компас-3D». Пилотные работы в части применения и отладки данного модуля проводятся на АО «ПО «Севмаш» и ряде других предприятий отрасли. Примером результатов этой работы является внедрение в версию «Компас-3D» 2020-го года системы экспресс расчета гидрогазодинамики на базе компонентов отечественного решателя Flow Vision. Такой подход к САПР как к модульной структуре с единым форматом файла позволяет в скором времени рассчитывать на появление отечественной САПР учитывающей запросы как отрасли в целом, так и отдельных предприятий в частности в связи с возможностью создания дополнительных модулей под конкретный завод-изготовитель и ЦКБ. Еще одной проблемой взаимодействия КБ – верфь является то, что инженеры предприятия не принимают участия в эскизном и техническом проектировании, к тому же, на стадии рабочего проектирования они производят только отработку чертежей на технологичность при их согласовании. Фактически инженерные службы приступают к подготовке производства лишь после получения рабочих чертежей, что значительно сдвигает сроки сдачи корабля. В настоящее время есть несколько вариантов решения проблемы:

1) на примере АО «Адмиралтейские верфи» можно отказаться от услуг проектанта и выполнять все проектные работы силами инженерного центра – инженерной службы предприятия, которая выполняет все работы, связанные с проектированием, подготовкой производства и сопровождением строительства;

2) эскизный, технический и рабочий проект выполняет проектант, однако, необходимо обеспечить участие в этих стадиях проектирования специалистов предприятия. Такую концепцию возможно реализовать в рамках организации непрерывного доступа всех участников проектирования к информационной модели;

3) передача на завод-строитель 3D-модели технического проекта, размеров функциональных объемов, электронной структуры изделия и т.д. На основе этой информации завод-строитель самостоятельно выпускает РКД, с учетом технологических особенностей собственного производства (рисунок 6).

Все предложенные варианты позволяют решать проблему доступа к проекту всех участников процесса, однако правильным решением этой проблемы является централизованное создание

единого проектно-производственного пространства (ЕППП) АО «ОСК». На данный момент этот проект не работает в полной мере.



Рис. 6. Ассоциативная связь модели и чертежа

При успешной реализации проекта ЕППП КБ будут выполнять проектирование на основе 3D-модели. Специалисты завода-строителя будут иметь доступ к готовым моделям, посредством единой сети. 3D-модель они будут использовать при подготовке производства, строительстве и т.д. Впоследствии к модели будет доступ и у дальнейших исполнителей при обеспечении жизненного цикла изделия: специалистов по эксплуатации, ремонту и утилизации.

Выполнять корректировку указанных моделей проектант будет на своем сервере, при выполнении корректировки всем участникам процесса высылается уведомление об изменении.

На заводах – строителях также существует проблема использования 3D-модели в производстве. В настоящее время заводы используют модель при плазово-технологической подготовке производства и при выполнении гибки труб на станках с ЧПУ. При этом не решена проблема доступа производственных участков к модели, а самих станков с ЧПУ на производстве недостаточно для полноценной работы. Решением этой проблемы является обеспечение производственных участков промышленными терминалами, мобильными средствами визуализации и организация на территории завода полномасштабной сети, в том числе беспроводной. Необходимо, кроме того, производить модернизацию производств и закупку современного оборудования способного выполнять работу на основе управляющих программ. В настоящее время на АО «СНЗ» создан проект «Цифровая верфь», в рамках которого отрабатывается внедрение модели во все стадии производства [3].

4. Универсальные и специализированные судостроительные САПР – мировой опыт

В настоящее время в России на многих судостроительных предприятиях и бюро применяются универсальные САПР системы, такие как Catia, Inventor, CreoParametric, AutoCAD. Это обусловлено в первую очередь низкой стоимостью содержания и лицензий таких САПР, простотой обучения и существованием поддержки на территории страны. Другой важной особенностью является специфика проектирования, характерная для России – изначальный проект, поставляемый на завод, не содержит проработку размещения оборудования. Размещение щитов, пультов, трассировка трубопроводов ложится на плечи инженерной службы завода-изготовителя. В связи с этим вести проработку размещения оборудования в рамках одного помещения, в отрыве от конструкции целого судна проще и быстрее в

машиностроительных САПР. Исторически сложившаяся в России ситуация, когда САПР начали внедряться быстрее со стороны заводо-изготовителей, по сравнению с бюро, приводит к тому, что бюро вынуждено выпускать модели также на базе машиностроительных универсальных САПР, подстраиваясь под уже внедренные на заводах решения. Это позволило в прошлом внедрить цифровые технологии с максимальной экономической эффективностью, но приводит к торможению развития цифровизации в настоящем. Мировой опыт диктует иной подход. В большинстве случаев судостроительные бюро и заводы используют модели, разработанные в специализированных, судостроительных САПР системах, таких как Foran, Aveva, Cadmatic, Shipconstructor, Nara [9]. При таком подходе вся цепочка проектирования может быть представлена в виде единой спирали.

В такой структуре предполагается проектирование судна в целом с самого начала с включением полной проработки систем, трассировки трубопроводов и т.д. При этом предполагается взаимовлияние этапов проектирования при внесении изменений или невозможности оптимального расположения оборудования. Использование судостроительной САПР помогает не только оперативно внедрять изменения и следить за согласованностью всей конструкции на разных этапах проектирования, но и производить базовые расчеты для оценки влияния изменений на общую эффективность конструкции и соответствие нормам выбранного регистра. Такой подход позволяет получить модель, близкую по своей сути к концепции цифрового двойника. На сегодняшний день в судостроительные САПР уже внедрены и модули обработки данных лазерного сканирования, технологии виртуальной и дополненной реальности [10, 11]. В Российской действительности проработка этих вопросов вновь идет по отдельному пути на базе неспециализированных программ. Выделим основные преимущества мирового опыта по внедрению специализированных судостроительных САПР, рисунок 7:

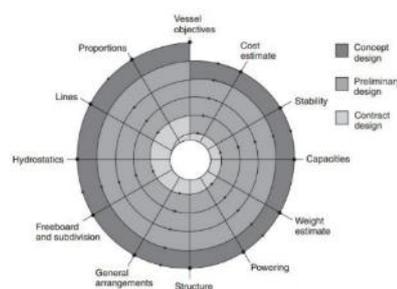


Рис. 7. Существующая схема проектирования с использованием судостроительных САПР

- 1) полный цикл проектирования на базе единых форматов и баз данных;
- 2) возможность комплексной оценки изменений и взаимовлияния всех элементов конструкции судна;
- 3) разработанные и применимые на практике алгоритмы совместной работы бюро и завода-строителя на базе общих серверов;

4) возможность применения современных технологий лазерного сканирования и виртуальной реальности с учетом судостроительной специфики.

Но однозначно критиковать Российский подход – нельзя. Внедрение универсальных САПР дает выигрыш в скорости при проектировании изделий МСЧ и в проектах, использующих максимально плотную компоновку оборудования, таких как, например, научные суда и промысловые суда, где большая часть времени тратится на отработку механики и моделирование оборудования [12, 13]. При этом остается возможность работать с импортированной геометрией поверхности. Выделим основные недостатки судостроительных САПР в контексте такого подхода:

- 1) сложности с твердотельным моделированием механизмов;
- 2) невозможность проверки собираемости и работоспособности изделий МСЧ;
- 3) сложность в освоении;
- 4) несовместимость форматов.

Исходя из представленных доводов, можно считать, что зарубежный подход лучше подходит для коммерческих судов с малой плотностью компоновки помещений. С другой стороны, Российский подход лучше применим для судов с развитой механизацией, плотной компоновкой и большим количеством сложных систем. Далее можно приступить к рассмотрению необходимых изменений в отрасли для осуществления гибридного подхода.

5. Изменения в структуре работы предприятия при переходе на единую модель создания корпуса судна по электронной модели

При переходе на новую технологию проектирование корпуса необходимо выполнять в едином информационном пространстве [3, 14, 15]. Все модели должны находиться на едином сервере, доступ к которому имеют все участники проектирования и строительства. Конструктор ЦКБ имеет возможность разрабатывать модель, вносить технические требования и при необходимости корректировать ее [16]. В нормативных документах необходимо определить модель как единственный документ, используемый на всех стадиях подготовки производства, строительства, а также при эксплуатации, ремонте и утилизации изделий. Требования к проектной модели должны быть едины для всех проектов, реализуемых в отечественном судостроении. Это позволит безболезненно проектантам и заводам-строителям проводить работу в рамках проектов, не подстраиваясь, каждый раз друг под друга. В части технической оснащенности ЦКБ должен обладать необходимым количеством лицензий САПР, позволяющих выполнять проект, а техническое оборудование должно постоянно модернизироваться, отвечая все новым требованиям проектных систем [17, 18].

6. Изменения в технологии подготовки производства

Подготовка производства на базе электронной модели должна производиться конструкторской службой предприятия. Для этого необходимо создать отдельную структуру, ответственную за подготовку производства. При этом остаются подразделения, осуществляющие сопровождение строительства по

модели, решающие с проектантом вопросы, возникающие на всех этапах строительства. Конструктор предприятия не должен иметь возможности вносить изменения в модель. Его функциями является снятие с модели необходимой информации по вопросам цехов, а также организация процесса подготовки производства, разработка на основе информации модели эскизов деталей, информации для изготовления узлов и секций и т.д. Технолог предприятия также не должен иметь возможности вносить изменения в теоретическую модель корпуса. Его функцией является внесение в модель необходимой технологической информации такой как, например, припуска. Результатом работы конструкторов и технологов предприятия должно стать создание технологической модели (рисунок 8).

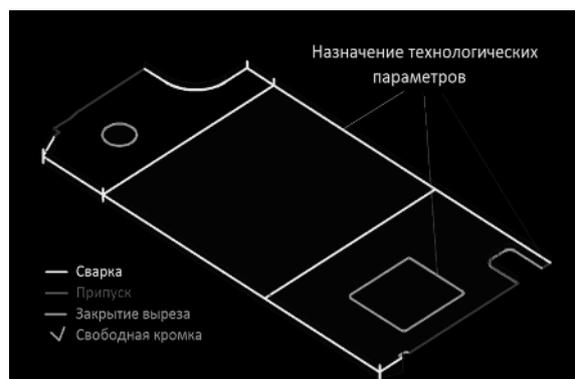


Рис. 8. Технологическая модель

Новая структура, осуществляющая подготовку производства должна иметь в своем составе специалистов, непосредственно выполняющих подготовку производства, а также группу программистов, которые отвечают за модернизацию процессов автоматизации подготовки и за внедрение и адаптацию новых станков с ЧПУ в корпусозаготовительном, корпусосварочном и стапельном производствах [19]. Подготовку производства необходимо осуществлять в рабочей системе уже действующей на предприятии, либо в технологическом модуле САПР. Передача электронных документов осуществляется через сеть предприятия дальнейшим исполнителям – технологам цехов, специалистам участков изготовления оснастки и т.д. Технологи корпусообработывающего цеха получают плазовые эскизы, осуществляют их технологическую проработку по электронной сети на участок раскроя, где будут формироваться управляющие программы. Далее данные программы должны передаваться на участок выполнения работ. Технологи корпусосборочного и стапельного производств получают необходимые технологические эскизы из конструкторской службы и передают их в электронном виде на участок выполнения работ. Технически, все участники подготовки производства должны быть оснащены современными ПК с установленными на них рабочими системами, либо технологическими модулями САПР. При этом доступ к полной электронной модели имеют только специалисты конструкторской службы предприятия, в то время как дальнейшие участники – технологи цехов будут иметь доступ только к необходимой им информации.

7. Изменение технологии строительства по электронной модели

Изготовление деталей, гибка, обработка будут выполняться по управляющим программам, разработанным специалистами корпусообработывающего цеха. Формирование конструкций в корпусосборочном и стапельном производствах будет производиться на основе информации, подготовленной специалистами конструкторской службы и технологической службы цеха – контуровочных эскизов, эскизов сборки

постелей и т.д. Все рабочие при выполнении своих работ будут получать только информацию, необходимую им для изготовления деталей и конструкций [19, 20]. Фактически технология строительства по электронной модели не претерпит серьезных изменений. Изменится только способ передачи информации от инженерных служб на участки и форма документов: вместо традиционных бумажных будут использоваться электронные. Таким образом, математическая модель создания корпусов на базе электронной модели должна выглядеть следующим образом (рисунок 9):



Рис. 9. Математическая модель создания корпуса на базе электронной модели

Внедрение новых технологий для трансформации производства под использование 3D модели является комплексным процессом. Ввиду масштабы изменений, оказывающих влияние не только на подготовку конструкторско-технологической документации, но и непосредственно на методы и технологии производства требуется расчет экономических затрат для определения целесообразности внедрения концепции на каждом конкретном предприятии.

8. Математическая модель определения затрат на модернизацию корпусного производства

Для создания математической модели необходимо определиться с основными направлениями затрат [20, 21].

8.1 Общий вид модели

В общем виде она должна описывать процессы на следующих технологических операциях: процесс проектирования, подготовки производства, изготовления узлов и секций, стапельной сборки. Схема процессов математической модели представлена на рисунке 10.



Рис. 10. Схема процессов для математической модели

В виде зависимости определение затрат на модернизацию технологии изготовления корпусных конструкций представлена в виде следующей формулы (1):

$$M = f(A, B, C, D, E, F) \quad (1)$$

где: A – процесс проектирования, B – процесс подготовки производства, C – процесс изготовления деталей, D – процесс изготовления узлов, E – процесс изготовления секций, F – стапельная сборка.

В свою очередь экономические затраты на модернизацию технологического процесса также

являются функциями, зависящими от целого ряда факторов.

8.2 Математическая модель модернизации проектирования корпусных конструкций

При модернизации процессов проектирования следует учитывать все параметры, которые следует оценивать при модернизации (2):

$$A = f(M_{ик}, M_{ис}, M_{об}, O_{и}) \quad (1)$$

где: $M_{ик}$ – модернизация/строительство инженерного корпуса, $M_{ис}$ – модернизация/создание инженерных сетей, $M_{об}$ – модернизация/закупка оборудования, $O_{и}$ – обучение инженерного персонала.

Значения затрат на модернизацию необходимо определять в зависимости от технического уровня предприятия. Если развитие процессов проектирования находится на высоком уровне и не требуется модернизация, то и затраты на данном этапе будут равны нулю [22].

8.3 Математическая модель модернизации подготовки производства

При модернизации процессов подготовки производства следует учитывать все параметры, которые следует оценивать при модернизации (3):

$$B = f(M_{тк}, M_{тс}, M_{тоб}, O_{т}) \quad (3)$$

где: $M_{тк}$ – модернизация/строительство технологического корпуса, $M_{тс}$ – модернизация/создание технологических сетей, $M_{тоб}$ – модернизация/закупка технологического оборудования, $O_{т}$ – обучение технологов.

8.4 Математическая модель модернизации процессов изготовления деталей

При модернизации процессов изготовления деталей следует учитывать все параметры, которые следует оценивать при модернизации (4):

$$C = f(M_{кц}, M_{скц}, M_{коб}, O_{кр}) \quad (4)$$

где: $M_{кц}$ – модернизация/строительство корпусообрабатывающего цеха, $M_{скц}$ – модернизация/создание сетей корпусообрабатывающего цеха, $M_{коб}$ – модернизация/закупка оборудования корпусообрабатывающего цеха, $O_{кр}$ – обучение рабочих и специалистов корпусообрабатывающего цеха.

8.5 Математическая модель модернизации процессов изготовления узлов и секций

При модернизации процессов изготовления узлов и секций следует учитывать все параметры, которые следует оценивать при модернизации (5):

$$D, E = f(M_{ксс}, M_{ско}, M_{окс}, O_{ксп}) \quad (5)$$

где: $M_{ксс}$ – модернизация/строительство корпусосборочного цеха, $M_{ско}$ – модернизация/создание сетей корпусосборочного цеха, $M_{окс}$ – модернизация/закупка оборудования корпусосборочного цеха, $O_{ксп}$ – обучение рабочих и специалистов корпусосборочного цеха.

8.6 Математическая модель модернизации процессов формирования корпуса на стапеле

При модернизации процессов формирования корпуса на стапеле следует учитывать все параметры, которые следует оценивать при модернизации (6):

$$F = f(M_{сц}, M_{ссц}, M_{ост}, O_{орс}) \quad (6)$$

где: $M_{сц}$ – модернизация/строительство стапельного производства, $M_{ссц}$ – модернизация/создание сетей стапельного производства, $M_{ост}$ – модернизация/закупка оборудования стапельного производства, $O_{орс}$ – обучение рабочих и специалистов стапельного производства.

8.7 Математическая модель модернизации производства

Все слагаемые функций можно также сгруппировать по направлениям:

1) Модернизация инфраструктуры (7):

$$M_{и} = f(M_{ик}, M_{тк}, M_{кц}, M_{ксс}, M_{сц}) \quad (6)$$

2) Модернизация сетей (8):

$$M_{с} = f(M_{ис}, M_{тс}, M_{скц}, M_{ско}, M_{ссц}) \quad (6)$$

3) Модернизация оборудования (9):

$$M_{о} = f(M_{об}, M_{тоб}, M_{коб}, M_{окс}, M_{ост}) \quad (9)$$

4) Обучение персонала (10):

$$O_{п} = f(O_{и}, O_{т}, O_{кр}, O_{ксп}, O_{орс}) \quad (10)$$

Таким образом, математическую модель модернизации всего корпусного производства можно представить в виде матрицы (11):

$$M = f \begin{bmatrix} M_{ик} & M_{тк} & M_{кц} & M_{ксс} & M_{сц} \\ M_{ис} & M_{тс} & M_{скц} & M_{ско} & M_{ссц} \\ M_{об} & M_{тоб} & M_{коб} & M_{окс} & M_{ост} \\ O_{и} & O_{т} & O_{кр} & O_{ксп} & O_{орс} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Как видно из матрицы модернизацию корпусного производства необходимо вести по 20 основным направлениям, которые охватывают все вопросы внедрения новой технологии. При этом глубину модернизации, объемы закупки оборудования и обучения различных категорий персонала необходимо определять исходя из анализа существующих мощностей.

Заключение

В судостроительной отрасли актуализирован вопрос о присвоении 3D модели статуса официального руководящего документа, лежащего в основе проектирования и строительства корабля. Препятствиями являются отсутствие общепринятой САПР или конвертора, обеспечивающего взаимодействие различных САПР, отсутствие на заводе-строителе инфраструктуры для полномасштабного внедрения 3D модели на всех

этапах производства. Однако проводящиеся сегодня разработки позволяют рассчитывать на появление в скором времени, как и единого САПР на базе существующего «Компас-3D», удовлетворяющего требования отрасли, так и конвертера форматов данных. Инфраструктура для полномасштабного использования 3D модели в качестве руководящего документа также может быть создана в кратчайшие сроки с помощью предложенных авторами методов. Все это позволяет сказать, что в недалеком будущем взаимодействие между проектантом и заводом-

строителем в судостроительной отрасли приобретет новое, более эффективное цифровое воплощение, что позволит увеличить экономическую эффективность и снизить сроки строительства заказов.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием Росрыболовства на выполнение НИР, тема №18 «Разработка рекомендаций по переходу рыбной отрасли к платформенной экономике».

Литература

1. Зайцев А.М., Шачнев С.Ю. Взаимодействие САПР PRO/Engineer и САПР ADEM в сквозном цикле создания изделия // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. №3(70). С. 50-57.
2. Думин А.В. Новая ИТ-стратегия ОАО «Объединенная судостроительная компания» // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. №3(70). С. 33-36.
3. Будниченко М.В., Спиридонов А.Ю. Модернизация процессов строительства кораблей в АО «ПО «Севмаш» с использованием цифровых технологий // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. 2018. С. 34-42.
4. Y. Okumoto, K. Hiyoku, N. Uesugi. Simulation based production using 3-D CAD in shipbuilding. International Journal of CAD/CAM. 2009. 6(1). Pp. 1-10.
5. R.P. Fernández, R.P. Lado. Integration between shipbuilding CAD Systems and a generic PLM tool in naval projects. Computer Science. 2015. 2(5). Pp. 181-191
6. H. Dasarapalli. Interaction of design-production stages in hull and piping shipbuilding works. Master Thesis. 2015. 110 P.
7. Абдулин А.Я., Сенюшкин Н.С., Суханов А.В. и Ямалиев Р.Р. Системы автоматизированного проектирования как инструмент решения наукоемких конструкторских задач судостроения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. №6(10). С. 1-4.
8. Денисов Д.В., Калинин Д.С. Новые информационные технологии в машиностроении: интегрированная инженерная программная платформа «Гербарий» // Новые технологии в учебном процессе и производстве. 2017. С. 189-192.
9. P.F. Rodrigo, C.L. Gonzalez. History and Evolution of Shipbuilding Oriented CAD Tools. COMPIT. 2015. Vol. 1. Pp. 8-21.
10. H. Nowacki. Splines in shipbuilding. Proc. 21st Duisburg colloquium on marine technology. 2000. Pp. 27-53.
11. D. Larkins, M. Waldie, D. Morais. A scalable approach to 3D visualization and review through the shipbuilding lifecycle. International Conference on Computer Applications in Shipbuilding. 2013. Pp. 1-8.
12. M. Zhang, X. Zhao, C. Voss, G. Zhu. Innovating through services, co-creation and supplier integration: Cases from China. International Journal of Production Economics. 2016. 171. Pp. 289-300.
13. L.S. Riza, A. Janusz, D. Slezak, C. Cornelis, F. Herrera, J.M. Benitez, S. Stawicki. Package 'RoughSets'. Data Analysis Using Rough Set and Fuzzy Rough Set Theorie. 2015. 127 P.
14. A. Mishr, A. Chandrasekaran, A. MacCormack. Collaboration in Multi-Partner R&D projects: The impact of partnering scale and scope. Journal of Operations Management. 2015. 33. Pp. 1-14.
15. M.H. Mello, J.O. Strandhagen, E. Alfnes. The role of coordination in avoiding project delays in an engineer-to-order supply chain. Journal of Manufacturing Technology Management. 2015. 26(3). Pp. 429-454.
16. S.M. Johnsen, L. Hvam. Understanding the impact of non-standard customisations in an engineer-to-order context: A case study. International Journal of Production Research. 2019. 57(21). Pp. 6780-6794.
17. P.E. Eriksson. Partnering in engineering projects: Four dimensions of supply chain integration. Journal of Purchasing and Supply Management. 2015. 21(1). Pp. 38-50.
18. A. Chaudhuri, H. Boer. The impact of product-process complexity and new product development order winners on new product development performance: The mediating role of collaborative competence. Journal of Engineering and Technology Management. 2016. 42. Pp. 65-80.
19. Бережной Я.Д. Цифровизация создания кораблей: современное состояние и перспективы внедрения. Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2019. №2. С. 47-50.
20. Зуева А.С., Мамедова Л.Э.Г., Гоголюхина М.Е. Цифровые системы управления в судостроении. Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2018. № 1(1). 18 С.
21. K. Hiekata, M. Grau. Shipbuilding. Concurrent Engineering in the 21st Century Springer International Publishing. 2015. Pp. 671-700.
22. Карташев Е.Н., Красовский В.С. О едином информационном пространстве в судостроительной отрасли. Навигация и гидрография. 2012. №34. С. 43-47.

References

1. Zaytsev A.M., SHachnev S.YU. Vzaimodeystviye SAPR PRO/Engineer i SAPR ADEM v skvoznom tsikle sozdaniya izdeliya [Interaction of CAD PRO / Engineer and CAD ADEM in the end-to-end cycle of product creation]. Transport Rossiyskoy Federatsii. ZHurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2017. no.3(70). s. 50-57.

2. Dumin A.V. Novaya IT-strategiya OAO «Ob'yedinennaya sudostroitel'naya kompaniya» [New IT strategy of JSC "United Shipbuilding Company"]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*. 2017. no. 3(70). s. 33-36.
3. Budnichenko M.V., Spiridonov A.YU. Modernizatsiya protsessov stroitel'stva korably v AO «PO «Sevmash» s ispol'zovaniyem tsifrovyykh tekhnologiy [Modernization of ship construction processes at JSC «PO Sevmash» using digital technologies]. *Sistemy upravleniya polnym zhiznennym tsiklom vysokotekhnologichnoy produktsii v mashinostroyenii: novyye istochniki rosta*. 2018. s. 34-42.
4. Y. Okumoto, K. Hiyoku, N. Uesugi. Simulation based production using 3-D CAD in shipbuilding. *International Journal of CAD/CAM*. 2009. 6(1). Pp. 1-10.
5. R.P. Fernández, R.P. Lado. Integration between shipbuilding CAD Systems and a generic PLM tool in naval projects. *Computer Science*. 2015. 2(5). Pp. 181-191
6. H. Dasarapalli. Interaction of design-production stages in hull and piping shipbuilding works. *Master Thesis*. 2015. 110 P.
7. Abdulin A.YA., Senyushkin N.S., Sukhanov A.V. i YAmaliyev R.R. Sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya kak instrument resheniya naukoemkikh konstruktorskikh zadach sudostroyeniya [Computer-aided design systems as a tool for solving science-intensive design problems of shipbuilding]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. no. 6(10). s. 1-4.
8. Denisov D.V., Kalinkin D.S. Novyye informatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii: integrirovannaya inzhenernaya programmaya platforma «Gerbariy» [New information technologies in mechanical engineering: integrated engineering software platform «Gerbariy»]. *Novyye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve*. 2017. s. 189-192.
9. P.F. Rodrigo, C.L. Gonzalez. History and Evolution of Shipbuilding Oriented CAD Tools. *COMPIT*. 2015. Vol. 1. Pp. 8-21.
10. H. Nowacki. Splines in shipbuilding. *Proc. 21st Duisburg colloquium on marine technology*. 2000. Pp. 27-53.
11. D. Larkins, M. Waldie, D. Morais. A scalable approach to 3D visualization and review through the shipbuilding lifecycle. *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*. 2013. Pp. 1-8.
12. M. Zhang, X. Zhao, C. Voss, G. Zhu. Innovating through services, co-creation and supplier integration: Cases from China. *International Journal of Production Economics*. 2016. 171. Pp. 289-300.
13. L.S. Riza, A. Janusz, D. Slezak, C. Cornelis, F. Herrera, J.M. Benitez, S. Stawicki. Package 'RoughSets'. *Data Analysis Using Rough Set and Fuzzy Rough Set Theorie*. 2015. 127 P.
14. A. Mishr, A. Chandrasekaran, A. MacCormack. Collaboration in Multi-Partner R&D projects: The impact of partnering scale and scope. *Journal of Operations Management*. 2015. 33. Pp. 1-14.
15. M.H. Mello, J.O. Strandhagen, E. Alfnes. The role of coordination in avoiding project delays in an engineer-to-order supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2015. 26(3). Pp. 429-454.
16. S.M. Johnsen, L. Hvam. Understanding the impact of non-standard customisations in an engineer-to-order context: A case study. *International Journal of Production Research*. 2019. 57(21). Pp. 6780-6794.
17. P.E. Eriksson. Partnering in engineering projects: Four dimensions of supply chain integration. *Journal of Purchasing and Supply Management*. 2015. 21(1). Pp. 38-50.
18. A. Chaudhuri, H. Boer. The impact of product-process complexity and new product development order winners on new product development performance: The mediating role of collaborative competence. *Journal of Engineering and Technology Management*. 2016. 42. Pp. 65-80.
19. Berezhnoy YA.D. TSifrovizatsiya sozdaniya korably: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy vnedreniya [Digitalization of the creation of ships: current state and prospects of implementation]. *Nauchnyy vestnik oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii*. 2019. no. 2. s. 47-50.
20. Zuyeva A.S., Mamedova L.E.G., Gogolyukhina M.E. TSifrovyye sistemy upravleniya v sudostroyenii [Digital control systems in shipbuilding]. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. no. 1(1). 18 P.
21. K. Hiekata, M. Grau. *Shipbuilding. Concurrent Engineering in the 21st Century* Springer International Publishing. 2015. Pp. 671-700.
22. Kartashev E.N., Krasovskiy V.S. O edinom informatsionnom prostranstve v sudostroitel'noy otrasli [On a single information space in the shipbuilding industry]. *Navigatsiya i gidrografiya*. 2012. no. 34. s. 43-47.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максим Михайлович Корзин, аспирант по направлению «технология судостроения и судоремонта», Санкт-Петербургский государственный технический университет, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 10, e-mail: korzin.max@gmail.ru; начальник сектора, АО ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Павел Геннадьевич Зобов, студент 5-го курса по направлению «кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», Институт судостроения и морской арктической техники, 164500, Северодвинск, Воронина ул., 6, e-mail:

Maksim M. Korzin, a graduate student in the direction of «technology of shipbuilding and ship repair», St. Petersburg State Technical University, 190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya st., 10, e-mail: korzin.max@gmail.ru; Head of Sector, JSC PA «Sevmash», 164500, Severodvinsk, Arkhangelskoe hw., 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Pavel G. Zobov, 5th year student in the direction of «shipbuilding, ocean engineering and systems engineering of marine infrastructure facilities», Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology, 164500, Severodvinsk, Voronina st., 6, e-mail: pavelzobov98@mail.ru; design engineer, JSC

pavelzobov98@mail.ru; инженер-конструктор, АО ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Александр Владимирович Дектярев, аспирант по направлению «технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства», Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: nwasanches@mail.ru; главный специалист Управления по развитию производственной системы, АО «ПСЗ Янтарь», 236005, Калининград, пр. Гуськова, 1, e-mail: a.dektyarev@shipyard-yantar.ru

Владимир Николаевич Морозов, кандидат технических наук, профессор кафедры кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: mvn3613@gmail.com

Ксения Сергеевна Ванюшкина, магистрант 1-го курса по направлению «кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», Институт судостроения и морской арктической техники, 164500, Северодвинск, Воронина ул., 6, e-mail: kseniai1994202@icloud.com, инженер-технолог 3 кат., АО «ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Илья Юрьевич Лукин, инженер-конструктор 2 кат., АО ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Арина Александровна Сивкова, магистрант 1-го курса по направлению «кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры», Институт судостроения и морской арктической техники, 164500, Северодвинск, Воронина ул., 6, e-mail: sivkova-98@list.ru, инженер-конструктор АО «ПО «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

PA «Севмаш», 164500, Северодвинск, Архангельское шоссе, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Alexander V. Dektyarev, a graduate student in the direction of «Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production», Kaliningrad state technical university, Sovetskiy ave, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: nwasanches@mail.ru; Chief Specialist of the Production System Development Department, JSC «Yantar» Baltic Shipbuilding plant, Gus'kova ave, 1, Kaliningrad, 236005, e-mail: a.dektyarev@shipyard-yantar.ru

Vladimir N. Morozov, Ph.D. (Eng), Professor of the Department of Shipbuilding, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy ave., 1, e-mail: mvn3613@gmail.com

Ksenia S. Vanyushkina, 1st year master's student in the direction of «shipbuilding, ocean engineering and systems engineering of marine infrastructure facilities», Institute of Shipbuilding and Arctic Marine Engineering, 164500, Severodvinsk, Voronina st., 6, e-mail: kseniai1994202@icloud.com, Process Engineer 3rd cat., JSC PA «Севмаш», 164500, Severodvinsk, Arkhangelskoe hw., 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Il'ya Yu. Lukin, design engineer 2nd cat., JSC PA «Севмаш», 164500, Severodvinsk, Arkhangelskoe shosse, 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

Arina A. Sivkova, 1st year master's student in the direction of «shipbuilding, ocean engineering and systems engineering of marine infrastructure facilities», Institute of Shipbuilding and Arctic Marine Engineering, 164500, Severodvinsk, Voronina st., 6, e-mail: sivkova-98@list.ru, design engineer JSC PA «Севмаш», 164500, Severodvinsk, Arkhangelskoe hw., 58, e-mail: pkb92@sevmash.ru

УДК 621.311:629.12

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.067

Определение надежности электроснабжения судовых ответственных приемников электроэнергии

С.Е. Кузнецов¹, Н.А. Алексеев¹, А.А. Виноградов¹¹Государственный университет морского и речного флота имени адмирал С.О. Макарова

Аннотация. Изложена методика расчета показателей безотказности электроснабжения (вероятности безотказного электроснабжения и средней наработки до отказа) ответственных приемников морского судна, подключаемых к аварийному электрораспределительному щиту. Методика реализована применительно к судовой электроэнергетической системе с тремя источниками электроэнергии – двумя основными дизель-генераторными агрегатами, подключенными к главному электрораспределительному щиту, и одним аварийным дизель-генераторным агрегатом, подключенным к аварийному электрораспределительному щиту. Рассмотрены различные режимы работы судовой электроэнергетической системы: при работе до первого отказа одного основного дизель-генератора, при параллельной работе двух основных дизель-генераторов, при работе одного аварийного дизель-генератора; а также после обесточивания с учетом возможности последующего включения резервного или (и) аварийного дизель генератора. Методика, с соответствующими корректировками, может быть использована для расчета показателей безотказного электроснабжения в судовых электроэнергетических системах другой комплектации. Расчет показателей безотказности электроснабжения необходим при проектировании для обеспечения требуемого уровня надежности электроснабжения судовых приемников электроэнергии, а при эксплуатации – для предупреждения отказов и планирования технического обслуживания и ремонта элементов судовых электроэнергетических систем.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, основные режимы работы, ответственные приемники электрической энергии, показатели надежности, вероятность безотказности электроснабжения, средняя наработка до отказа.

Determination of reliability of power supply of ship's responsible power receivers

Sergey E. Kuznetsov¹, Nikolay A. Alekseev¹, Andrey A. Vinogradov¹¹Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The methodology for calculating the indicators of the reliability of power supply (the probability of failure-free power supply and the mean time to failure) of critical receivers of a sea vessel connected to the emergency electrical switchboard is presented. The technique is implemented in relation to a ship power system with three sources of electricity - two main diesel generator sets connected to the main electrical switchboard, and one emergency diesel generator set connected to an emergency electrical switchboard. Various operating modes of the ship's electric power system are considered: during operation until the first failure of one main diesel generator, during parallel operation of two main diesel generators, during operation of one emergency diesel generator; as well as after de-energizing, taking into account the possibility of subsequent switching on of the backup and / or emergency diesel generator. The technique, with appropriate adjustments, can be used to calculate indicators of reliable power supply in ship power systems of a different configuration. Calculation of power supply reliability indicators is necessary during design to ensure the required level of power supply reliability for ship power receivers, and during operation - to prevent failures and plan maintenance and repair of elements of ship power systems.

Key words: ship power system, main modes of operation, responsible receivers of electrical energy, reliability indicators, probability of power supply reliability, mean time to failure.

Введение

На судах морского флота ответственные приемники электроэнергии подключаются к аварийному электрораспределительному щиту (АРЩ), который в нормальном режиме работы судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) получает питание от главного электрораспределительного щита (ГРЩ), к которому подключаются основные источники электроэнергии, а при обесточивании ГРЩ к нему подключается резервный источник электроэнергии или к АРЩ подключается аварийный источник электроэнергии. В качестве основных и аварийных источников электроэнергии обычно используются дизель-генераторные агрегаты со среднеоборотными дизелями и бесщеточными синхронными генераторами [1,2].

Процедуру определения показателей надежности электроснабжения ответственных приемников рассмотрим на примере СЭЭС с двумя основными

G1 и G2 и одним аварийным G3 источниками электроэнергии – дизель-генераторами. Рассматриваемая упрощенная однолинейная схема электроснабжения ответственных приемников электроэнергии (ОП) с тремя дизель-генераторами G1-G3 и шестью автоматическими выключателями QF1-QF6 показана на рис. 1.

Для выполнения расчетов необходимо знать значения вероятностей безотказной работы элементов структурной схемы – автоматических выключателей P_{QF} и дизель-генераторов P_G . По справочным данным [3,4] полагая, что в рассматриваемой системе все дизель-генераторы имеют одинаковые значения интенсивности отказов λ_G , то есть

$$\lambda_G = \lambda_{G1} = \lambda_{G2} = \lambda_{G3} = 160 \cdot 10^{-6} / \text{ч},$$

а также все автоматические воздушные выключатели имеют одинаковые значения интенсивности отказов

$$\lambda_{QF} = \lambda_{QF1} = \lambda_{QF2} = \dots = \lambda_{QF6} = 1,2 \cdot 10^{-6} / \text{ч}.$$

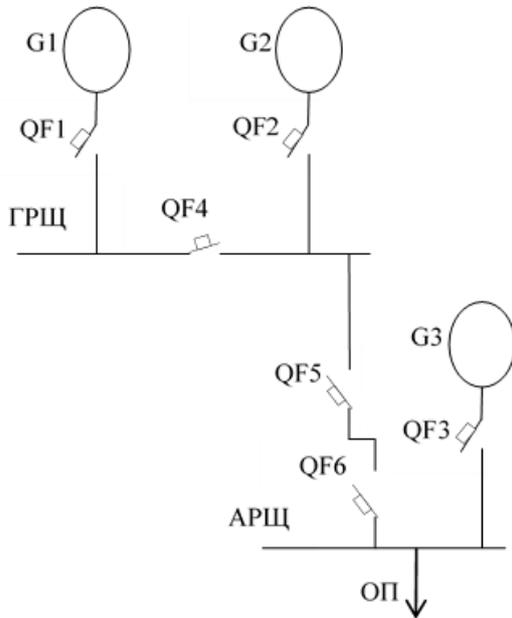


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения ответственных приёмников от двух основных и одного аварийного источников электроэнергии.

Тогда, полагая, что вероятность безотказной работы элементов системы электроснабжения изменяется во времени по экспоненциальному закону, получим

$$P_G = P_{G1} = P_{G2} = P_{G3} = e^{(-\lambda_G \cdot t)};$$

$$P_{QF} = P_{QF1} = P_{QF2} = P_{QF3} = \dots P_{QF6} = e^{-\lambda_{QF} \cdot t}.$$

Рассмотрим три основных режима работы СЭЭС (в ходовом, маневренном и аварийном режимах работы судна) до первого отказа электроснабжения ОП, то есть до первого обесточивания АРЩ, полагая, что для электроснабжения ОП достаточно мощности одного основного или аварийного дизель-генератора, и четвертый режим с восстановлением электроснабжения ОП после обесточивания АРЩ:

1. Ходовой режим, когда работает один основной дизель-генератор G1.
2. Маневренный режим, когда работают два основных дизель-генератора G1 и G2.
3. Аварийный режим, когда работает аварийный дизель-генератор G3.
4. Режим работы с восстановлением электроснабжения ОП после обесточивания.

Вероятность безотказного электроснабжения в СЭЭС будем определять за время работы $t=1000$ ч.

В режиме 1 (рис.2) ответственные приемники получают питание от генератора G1 по цепи П1→P_{G1}, P_{QF1}, P_{QF4}, P_{QF5}, P_{QF6}.

На рис.2 квадратиками обозначены элементы схемы электроснабжения с соответствующими обозначениями вероятностей P их безотказной работы. При составлении расчетной схемы кабели и шины ГРЩ и АРЩ не учитывались, так как их интенсивность отказов λ на несколько порядков ниже интенсивности отказов других элементов системы электроснабжения (дизель-генераторов и автоматических выключателей) [3,4].

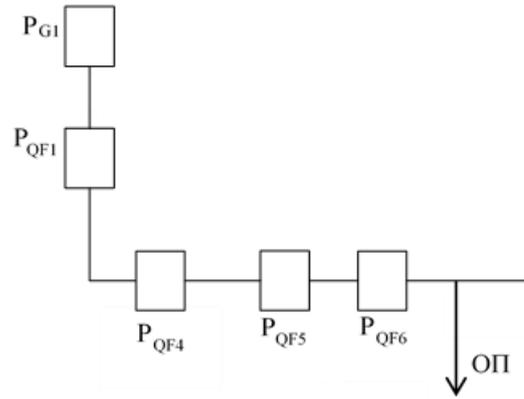


Рис. 2. Структурная схема для расчета показателей надежности электроснабжения ответственных приемников в режиме 1.

Указанные элементы в смысле надежности соединены последовательно. Вероятность безотказной работы цепи П1 (вероятность безотказного электроснабжения ОП) будет

$$P_1(t) = P_{G1}(t) \cdot P_{QF1}(t) \cdot P_{QF4}(t) \cdot P_{QF5}(t) \cdot P_{QF6}(t) \\ = \exp\left[-(\lambda_{G1} + \lambda_{QF1} + \lambda_{QF4} + \lambda_{QF5} + \lambda_{QF6}) \cdot t\right] \\ = \exp[-(\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t]$$

За время $t=1000$ ч получим

$$P_1(1000) = \exp\left[-(160 + 4 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot 1000\right] \approx 0,848$$

Соответственно, средняя наработка этой цепи до отказа составит

$$T_{cp1} = \int_0^{\infty} P_1(t) \cdot dt = \\ = \int_0^{\infty} \exp\left[-(\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t\right] \cdot dt = \\ = 1 / (\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) = \\ = 10^6 / (160 + 4 \cdot 1,2) = 6068 \text{ ч.}$$

В режиме 2 (рис.3) ответственные приемники получают питание от параллельно работающих двух генераторов по цепям П11→P_{G1}, P_{QF1}, P_{QF4} и П2→P_{G2}, P_{QF2} через цепь двух автоматических выключателей П4→P_{QF5}, P_{QF6}.

Условием безотказного электроснабжения ОП в этом режиме будет работоспособность цепи П4 и работоспособность двух цепей П11 и П2 или работоспособность одной из этих двух цепей, поэтому [4] возможны четыре гипотезы (табл.1) о состоянии двух цепей питания (РС – работоспособное состояние, НРС – неработоспособное состояние).

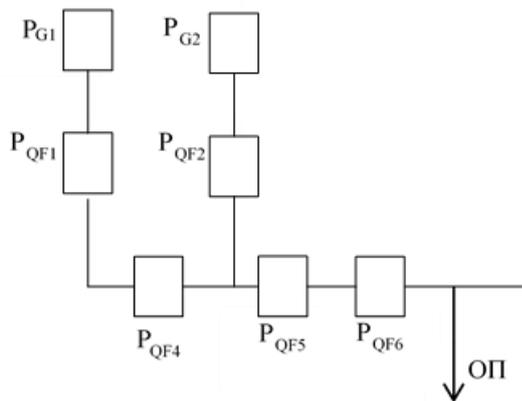


Рис. 3. Структурная схема для расчета показателей надежности электроснабжения ответственных приемников в режиме 2.

Таблица 1
Гипотезы о состояниях двух цепей питания П11 и П2

Цепь питания	Гипотезы			
	Г1	Г2	Г3	Г4
П11	РС	НРС	НРС	РС
П2	РС	НРС	РС	НРС

Вероятность безотказной работы хотя бы одной цепи питания на двух П11 и П2 (вероятность безотказного электроснабжения ОП), согласно табл.1, будет рассчитываться по формуле (1):

$$P_{П11;П2} = Вер(Г1) + Вер(Г3) + Вер(Г4) = (1)$$

$$= P_{П11} \cdot P_{П2} + (1 - P_{П11}) \cdot P_{П2} + (1 - P_{П2}) \cdot P_{П11}.$$

Тогда с учетом цепи П4, вероятность безотказного электроснабжения ОП в режиме 2 будет рассчитываться по формуле (2):

$$P_2(t) = P_{П11;П2}(t) \cdot P_{П4}(t) =$$

$$= \exp[-(\lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] +$$

$$+ \exp[-(\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] + (2)$$

$$+ \exp[-(2 \cdot \lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t].$$

За время t=1000 ч получим вероятность безотказного электроснабжения ОП в режиме 2

$$P_2(1000) = \exp[-(160 + 3 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot 1000] +$$

$$+ \exp[-(160 + 4 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot 1000] +$$

$$+ \exp[-(2 \cdot 160 + 3 \cdot 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot 1000] = 0,974$$

Средняя наработка до отказа электроснабжения в режиме 2

$$T_{cp2} = \int_0^{\infty} P_2(t) \cdot dt =$$

$$= \int_0^{\infty} \{ \exp[-(\lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] +$$

$$+ \exp[-(\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] +$$

$$+ \exp[-(2 \cdot \lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] \} \cdot dt =$$

$$= 1 / (\lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) + 1 / (\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) -$$

$$- 1 / (2 \cdot \lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) = 9091 \text{ ч.}$$

В аварийном режиме работы 3 (рис.4) ответственные приемники получают питание от генератора G3 по цепи П5→P_G3, P_QF3.

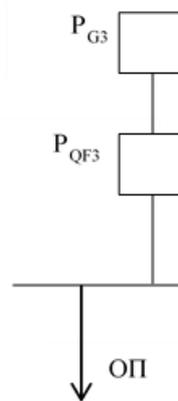


Рис. 4. Структурная схема для расчета показателей надежности электроснабжения ответственных приемников в режиме 3.

Вероятность безотказной работы цепи П5, то есть вероятность безотказного электроснабжения ОП будет рассчитываться по формуле (3):

$$P_3(t) = P_{G3}(t) \cdot P_{QF3}(t) = (3)$$

$$= \exp[-(\lambda_{G3} + \lambda_{QF3}) \cdot t].$$

За время t=1000 ч получим

$$P_3(1000) =$$

$$= \exp[-(160 + 1,2) \cdot 10^{-6} \cdot 1000] = 0,851.$$

Средняя наработка до отказа составит

$$T_{cp3} = \int_0^{\infty} P_3(t) \cdot dt =$$

$$= \int_0^{\infty} \exp[-(\lambda_{G3} + \lambda_{QF3}) \cdot t] \cdot dt =$$

$$= 1 / (\lambda_{G3} + \lambda_{QF3}) =$$

$$= 10^3 / (160 + 1,2) = 6203 \text{ ч.}$$

В процессе эксплуатации при возникновении отказа электроснабжения ОП включается резервный или аварийный дизель-генератор и принимаются меры для устранения причин и последствий отказа.

Если это включение производится в пределах установленного времени (общее время пуска и приема нагрузки генератором не должно превышать 45с [5]), то существенных последствий отказа не возникает.

В этом случае при определении показателей безотказности электроснабжения ОП режим 4 с восстановлением электроснабжения ОП после обесточивания АРЩ может рассматриваться при работе одного основного дизель-генератора (ходовой режим) и при работе двух основных дизель-генераторов (маневренный режим) как режим голосования один из трех (достаточно работоспособности цепи питания от одного из трех дизель-генераторов для электроснабжения ОП), рис.5.

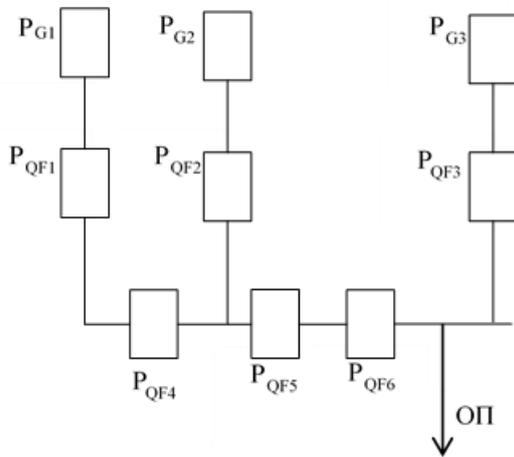


Рис. 5. Структурная схема для расчета показателей надежности электроснабжения ОП в режиме 4 с учетом восстановления электроснабжения после обесточивания.

Заменяв цепи питания ОП от дизель-генераторов G1 и G2 одной цепью, вероятность безотказной работы которой P2(t) определена в режиме 2-(2), и, зная вероятность безотказной работы P3(t)- цепи питания от дизель-генератора G3 –(3), получим четыре гипотезы (табл.2) о состоянии этих двух цепей питания.

Таблица 2

Гипотезы о состояниях двух цепей питания от генераторов G1, G2, G3

Цепь питания	Гипотезы			
	G1	G2	G3	G4
От G1иG2;(P2)	PC	НPC	НPC	PC
От G3;(P3)	PC	НPC	PC	НPC

В соответствии с (1) вероятность безотказного электроснабжения ОП в режиме 4 с учетом восстановления электроснабжения будет равна (4):

$$\begin{aligned}
 P_4(t) &= P_2(t) \cdot P_3(t) + \\
 &+ [1 - P_2(t)] \cdot P_3(t) + [(1 - P_3(t)) \cdot P_2(t)] = \\
 &= \exp[-(\lambda_G + \lambda_{QF}) \cdot t] + \\
 &+ \exp[-(\lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] + \\
 &+ \exp[-(\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] - \\
 &- \exp[-(2 \cdot \lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] - \\
 &- \exp[-(2 \cdot \lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t] + \\
 &+ \exp[-(3 \cdot \lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) \cdot t].
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Подставив в (4) $\lambda_G=160 \cdot 10^{-6}$ 1/ч и $\lambda_{QF}=1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, получим за время $t=1000$ ч $P_4(1000)=0,966$.

Средняя наработка до отказа электроснабжения в режиме 4 будет (5):

$$\begin{aligned}
 T_{cp4} &= \int_0^{\infty} P_4(t) \cdot dt = \\
 &= 1 / (\lambda_G + \lambda_{QF3}) + 1 / (\lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) + \\
 &+ 1 / (\lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) - 1 / (2 \cdot \lambda_G + 3 \cdot \lambda_{QF}) - \\
 &- 1 / (2 \cdot \lambda_G + 4 \cdot \lambda_{QF}) - 1 / (2 \cdot \lambda_G + 5 \cdot \lambda_{QF}) + \\
 &+ 1 / (3 \cdot \lambda_G + 5 \cdot \lambda_{QF}).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Подставив в (5) значения λ_G и λ_{QF} , получим $T_{cp4}=11209$ ч.

Полученные результаты расчетов показателей безотказности электроснабжения ОП приведены в табл. 3

Таблица 3

Результаты расчетов показателей безотказности электроснабжения ОП

Режим работы	P(1000)	T _{cp} , ч
Ходовой	0,848	6068
Маневренный	0,974	9091
Аварийный	0,851	6203
С восстановлением электроснабжения	0,996	11209

Показатели безотказности электроснабжения ОП (до первого отказа) несущественно отличаются в ходовом и аварийном режимах, а в маневренном режиме (по сравнению с ходовым и аварийным) вероятность безотказного электроснабжения выше примерно на 15%, а средняя наработка до отказа примерно на 50% выше.

В режиме 4 с восстановлением электроснабжения ОП после обесточивания, который реализуется в процессе эксплуатации СЭЭС, существенно повышаются вероятность безотказного электроснабжения и средняя наработка до отказа электроснабжения ОП в ходовом и маневренном режимах по сравнению с этими показателями до первого отказа.

Заключение

Изложена методика расчета показателей безотказности электроснабжения ответственных судовых приемников (до первого отказа – обесточивание аварийного электрораспределительного щита) и с учетом восстановления электроснабжения после обесточивания с ее реализацией для конкретных режимов работы судна; методика может быть

использована для аналогичных расчетов при других комплектациях и режимах работы СЭЭС.

Расчет показателей безотказности электроснабжения необходим при проектировании для обеспечения требуемого уровня надежности электроснабжения, а при эксплуатации – для планирования технического обслуживания и ремонта элементов СЭЭС с целью предупреждения отказов электроснабжения.

Литература

1. Лемин Л.А., Пруссаков А.В. Эксплуатация судовых систем электроснабжения: Учеб. Пособие// Лемин Л.А., Пруссаков А.В. – СПб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2003. – 132 с.
2. Кузнецов С.Е., Кудрявцев Ю.В. Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель-генератора. Судостроение, №6, 2011. – с.30-32.
3. Кузнецов С. Е. Техническая эксплуатация судового электрооборудования: учебно-справочное пособие //С.Е. Кузнецов, Л.А. Лемин, Ю.В. Кудрявцев, А.В. Пруссаков, Д.В. Исаков. – Москва: Проспект. – 2010. – 512 с.
4. Кузнецов С. Е. Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации//СЕ Кузнецов. – СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2015. – 584 с.
5. Правила классификации и постройки морских судов. - Т.2.-СПб.: РМРС, 2015.-807 с.

References

1. Lemin L.A., Prussakov A.V. Ekspluatatsiya sudovyh sistem elektrosnabzheniya [Operation of ship power supply systems]: Textbook Manual // Lemin L.A., Prussakov A.V. - SPb: Admiral Makarov State maritime academy, 2003.- 132 p.
2. Kuznetsov S.E., Kudryavtsev Yu.V. Vliyanie nagruzki i koeffitsienta moshchnosti na raskhod topliva sudovogo dizel'-generatora [Influence of load and power factor on fuel consumption of a marine diesel generator]. Shipbuilding, No. 6, 2011. - p.30-32.
3. Kuznetsov S.E. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovogo elektrooborudovaniya [Technical operation of ship electrical equipment]: a tutorial // S.E. Kuznetsov, L.A. Lemin, Yu.V. Kudryavtsev, A.V. Prussakov, D.V. Isakov. - Moscow: Prospect. - 2010.- 512 p.
4. Kuznetsov S.E. Osnovy tekhnicheskoy ekspluatatsii sudovogo elektrooborudovaniya i sredstv avtomatizatsii [Fundamentals of technical operation of ship electrical equipment and automation equipment]// SE Kuznetsov. - SPb: Publishing house of adm. Makarov State university of maritime and inland shipping. - 2015.- 584 p.
5. Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh sudov [Rules for the classification and construction of sea-going ships]. - T.2.-SPb.: RMRS, 2015.-807 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Емельянович Кузнецов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Судовых автоматизированных электроэнергетических систем, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kuznecovse@gumrf.ru

Sergey E. Kuznetsov, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Department of Ship's Automated Electric Power Systems. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: KuznecovSE@gumrf.ru

Николай Андреевич Алексеев, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой Судовые автоматизированные электроэнергетические системы, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: kaf_saees@gumrf.ru

Nikolay A. Alekseev, Professor, Ph.D. (Eng), head of the Department of Ship's Automated Electric Power Systems. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: kaf_saees@gumrf.ru

Андрей Александрович Виноградов, доцент кафедры Судовых автоматизированных электроэнергетических систем, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: eric_esseker@mail.ru

Andrey A. Vinogradov, Associate Professor of the Department of Ship's Automated Electric Power Systems. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: eric_esseker@mail.ru

УДК: 621.74:681.3

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.068

Устранение причин электрохимической коррозии обшивок судовВ.И. Веревкин¹, В.Ф. Игушев¹, С.А. Терюшева¹¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Аннотация. Напряжения, возникающие в термопарах, образованных в сварных узлах стальных обшивок, оказываются сопоставимыми с напряжениями самых чувствительных термопар. Это определяет высокий уровень склонности стальных сварных соединений к электрохимической коррозии и объясняет повышенный интерес, проявляемый судостроителями к проблеме её элиминирования. Влияние на термоэлектродвижущую силу кремния носят резкий зигзагообразный характер. Усредненный собственный потенциал от перепада температур в стальной заготовке изменяется по синусоидальному закону. Найдено, что наибольшее значение электрического потенциала исследованных сталей характерно при содержании кремния ниже 0,2%. Температура окружающей среды оказывает значительное влияние на потенциал, что важно при значительном колебании температуры воды и воздуха. Возникла необходимость научного анализа и интерпретации накопившихся сведений. В работе представлен один из вариантов возможного теоретического объяснения наблюдаемых явлений.

Ключевые слова: судостроительная сталь, электропотенциал, сварные соединения, кремний, электрохимическая коррозия, температура

Electrochemical reasons corrosion of shield skinsValery I. Verevkin¹, Valery F. Igushev¹, Svetlana A. Teryusheva¹¹Baltic State Academy of Fishing Fleet, Russian Federation

Abstract. The stresses arising in the thermocouples formed in the welded joints of the steel cladding are comparable to the stresses of the most sensitive thermocouples. This determines the high level of susceptibility of steel welded joints to electrochemical corrosion and explains the increased interest shown by shipbuilders to the problem of its elimination. The effect on the thermoelectromotive force of silicon is of a sharp zigzag character. The average self-potential from the temperature difference in the steel billet changes according to a sinusoidal law. It was found that the highest value of the electric potential of the investigated steels is characteristic when the silicon content is below 0.2%. The ambient temperature has a significant effect on the potential, which is important with significant fluctuations in the temperature of water and air. There was a need for scientific analysis and interpretation of the accumulated information. The paper presents one of the options for a possible theoretical explanation of the observed phenomena.

Key words: shipbuilding steel, electrical potential, welded joints, silicon, electrochemical corrosion, temperature

Введение

Самым разрушительным видом коррозии стальных обшивок судов является электрохимическая коррозия (ЭХК). При этом элементами, определяющими ресурс работы обшивок, являются сварные соединения. Причина этого обстоятельства состоит в значительной термоэлектродвижущей силе (ТЭДС) термопар, образованных из свариваемых между собой заготовок, выполненных из сталей различного состава [1, 2]. Традиционными методами защиты от ЭХК не только сварных соединений, но и всей обшивки являются: изолирующая, протекторная и катодная. Эти методы устраняют не причину возникновения коррозии, а её последствие.

Нами установлено, что основное влияние на формируемое напряжение сварной металлоконструкции оказывают раскислители [2]. Среди раскислителей основное влияние на ЭХК

Причины возникновения термоэлектродвижущих сил в стальной термопаре

Ниже проанализированы зависимости собственных потенциалов различных сталей обшивки судна от перепадов температур в её сварных соединениях.

Как известно, присутствие кремния в сталях за редкими исключениями является целесообразным,

поскольку он является самым дешевым и эффективным раскислителем.

Было предложено при строительстве судна подбирать заменяемые заготовки обшивок так, чтобы минимизировать образующуюся ТЭДС во всех сварных соединениях, закладывая тем их самым в обшивках минимальную склонность к ЭХК [4].

Кремний полностью растворяется в феррите при содержании кремния до 0,30 %. В связи с этим вывод: кремний в сталях в подавляющем большинстве случаев находится вблизи зоны насыщения. Именно это обстоятельство является важным условием развития термоэлектрических процессов и явлений в сварных стальных соединениях.

Главная особенность эксплуатации сварных соединений обшивок судов является низкий уровень перепада температур между рабочим и свободным концами образующейся термопары. Перепад температур лежит в диапазоне 0-60°C, что практически исключает диффузию в сварном соединении стальных элементов обшивки.

С точки зрения термообработки рассматриваемые явления и процессы касаются, прежде всего, микроотпуска материалов образованных сварными соединениями термопар, а также старения в условиях электростимулирования переменным по амплитуде напряжением.

Исследованы несколько судостроительных сталей, представленных в таблице 1. Измерены их собственные потенциалы (СП) для условий эксплуатации обшивок судов. На рис. 1 представлены зависимости СП сталей от перепада

температур между рабочим и свободным концами электродов. На рис. 2 – зависимости СП сталей от содержания в них кремния.

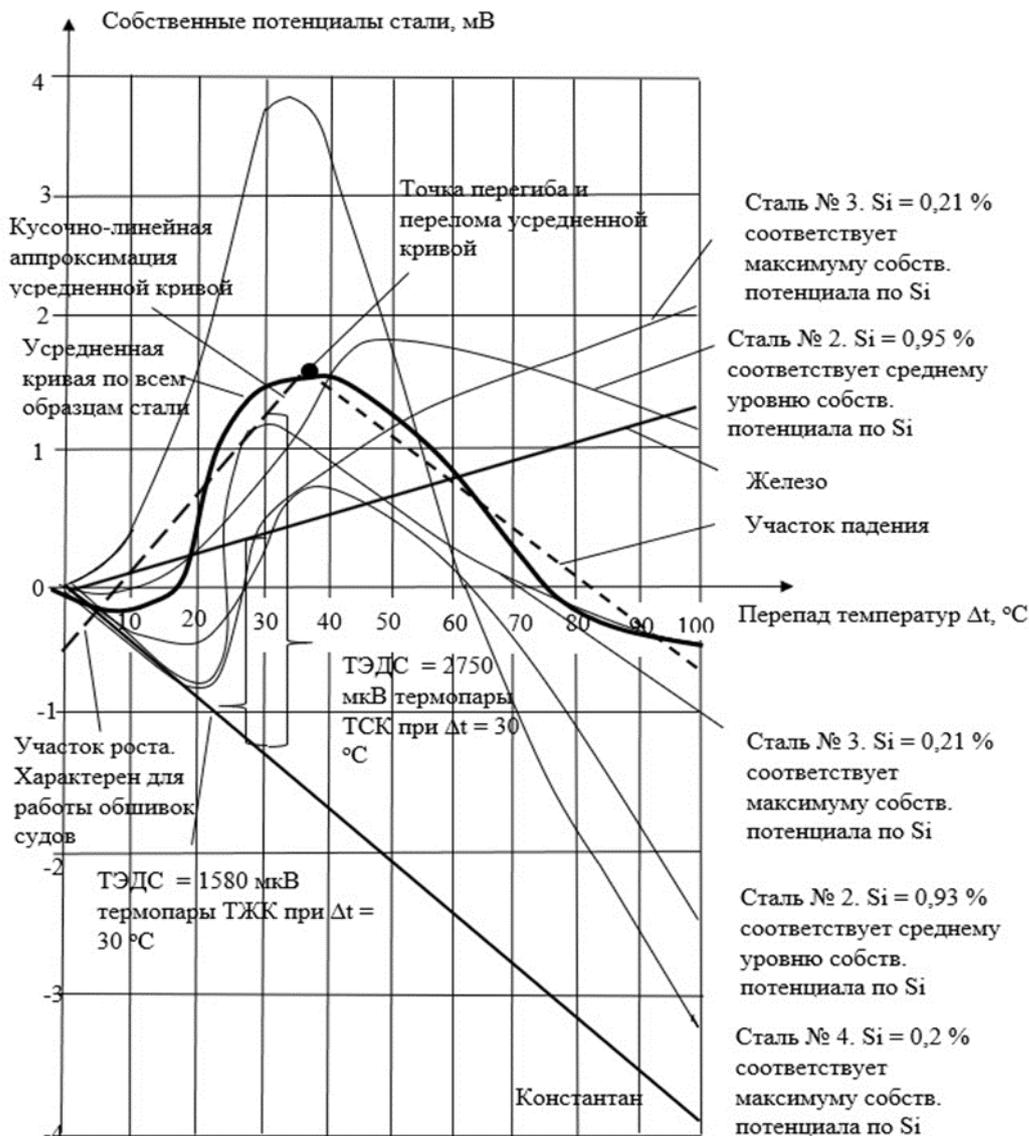


Рис. 1. Зависимости собственных потенциалов сталей от перепада температуры

Таблица 1

Химический состав стальных электродов судостроительных сталей, использованных в исследовании

№ стали	Сталь, марка	Химический состав стали, % x 100									
		Si	Cr	Ni	Cu	Mn	C	Mo	Ti	Al	V
1	D40S	95	89	52	43	79	14	-	0,7	3	0,4
2	D40S	93	87	51	42	75	12	-	1	2,6	0,3
3	E36	21	4	3	6	98	9	2	3	34	22
4	E32	20	3	3	2	121	15	<1	<5	33	<5
5	A36	24	4	2	4	91	9	2	3	29	26

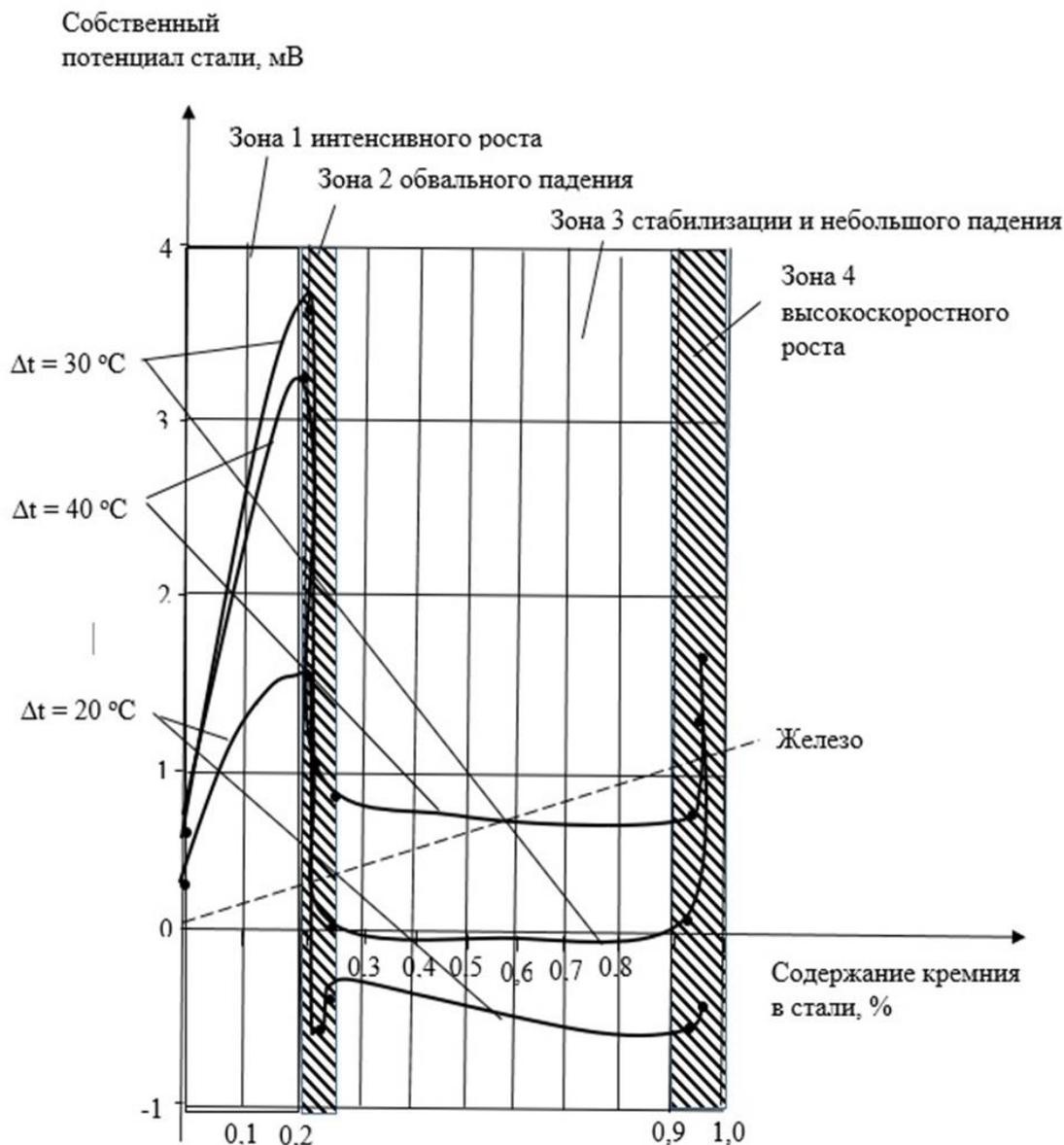


Рис. 2. Зависимость собственного потенциала стали от содержания в ней кремния при перепадах температур между рабочим и свободными концами термопары, характерных для эксплуатации обшивок судов

ТЭДС в сварных соединениях из стали возникает на границе сварного шва и околошовной зоны, прежде всего, вследствие увлечения электронов фононами. Это основной механизм образования ТЭДС [6].

Движение электронов по электроду носит массовый характер. Оно создает специфические энергетические условия и влияет на ход происходящего микроотпуска сварного соединения.

Разность энергий Ферми у электронов, скапливающихся у горячего и холодного концов электрода – это второй механизм образования ТЭДС [6]. Быстрые электроны движутся к горячему концу, медленные – к холодному. Быстрые электроны накапливаются у горячего конца, медленные – у холодного.

Создается градиент активности электронов по электроду. Идет миграция и перераспределение электронов. Поток электронов с большим запасом энергии более мощный, чем с меньшим запасом. У

горячего конца уровень Ферми выше, чем у холодного. Между концами будет энергетический перепад, выражающийся в разности электрических потенциалов (ТЭДС).

Под действием сформировавшегося электрического поля поверхностные анионы кремния смещаются в направлении к рабочему концу электрода. Это смещение оказывает влияние на поведение растворенного углерода. В свою очередь углерод вытесняется примерно в тех же пределах в направлении от аниона кремния, т.е., к холодному свободному концу электрода, частично освобождая связи железа под кремний. Учитывая множественность подобной процедуры, объем растворенного кремния в нагретой части электрода возрастает.

Находясь в области, расположенной вблизи предела растворимости кремния в кремнистом феррите, небольшого роста растворенного кремния оказывается достаточным для запуска процесса

обвального падения собственного потенциала стального электрода (см. рис. 2).

Импульсообразный характер зависимости собственного потенциала стали от перепада температур

Увеличение перепада температур вызывает изменение собственного потенциала стали, характерное для подачи сигнала на вход объекта с последующим его снятием (импульсообразная характеристика [7]).

Главной причиной, побуждающей стальной электрод термодары к росту в начале нагрева собственного потенциала, является массовое движение быстрых электронов к горячему рабочему концу. Отток электронов с холодного свободного конца электрода приводит к приобретению им положительного заряда. Процесс тормозится, когда возбужденные фононы переместят быстрые электроны к рабочему концу электрода

По мере падения собственного потенциала стали кремний и углерод по активности сначала сближаются, а затем – и меняются местами. Обвальное падение потенциала, определяемое именно поведением кремния в сплаве, приводит к снижению давления кремния на углерод сплава. Последний, активизируясь, частично восстанавливает свои позиции в кристаллической решетке сплава, оттесняя кремний на прежние места.

На второй стадии активизируется углерод стального электрода. Он тормозит начатый кремнием процесс электрической поляризации области рабочего спая электрода. Часть атомов углерода возвращаются на прежние позиции. Потенциал рабочего конца электрода постепенно падает. И имеет место частичное повторное растворение углерода в феррите.

В среднем линия зависимости потенциала железа от перепада температур достаточно точно аппроксимирует средневыворочную зависимость по различным маркам стали (рис. 2). В основном температурном диапазоне эксплуатации обшивок судов (от 0 до 60 °С) аппроксимирующая кривая уходит вверх, а после 60 °С – вниз. Область отклонения собственного потенциала стали вверх относительно потенциала железа при температуре до 60 °С объясняется действием кремния. После 60 °С уход средневыворочной стальной кривой ниже железной отражает потерю позиций в сплаве кремния и частичное восстановление позиций углерода.

Заключение

1. Кремний в сталях в подавляющем большинстве случаев находится вблизи зоны насыщения. Это определяет развитие термоэлектрических процессов и явлений в сварных стальных соединениях. Под действием фононов небольшого роста растворенного кремния оказывается достаточным для запуска процесса обвального падения собственного потенциала стального электрода. По мере падения собственного потенциала стали кремний и углерод по активности сначала сближаются, а затем – и меняются местами. Последний, активизируясь, частично восстанавливает свои позиции в кристаллической решетке сплава, оттесняя кремний на прежние места в направлении менее нагретого конца электрода.

2. Область отклонения собственного потенциала стали вверх относительно потенциала железа при температуре до 60°С объясняется действием кремния. После 60°С уход средневыворочной стальной кривой ниже железной отражает потерю позиций в сплаве кремния и частичное восстановление позиций углерода.

Литература

1. Андреев, Н.Т. Ремонт судов [Текст]: монография / Н.Т. Андреев, О.А. Борчевский, В.Г. Луговых [и др.]. - Л.: Судостроение, 1972. - 568 с.
2. Веревкин, В.И. Влияние содержания кремния и деформации сварных узлов из судостроительных сталей на их склонность к электрохимической коррозии (статья) / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. // Морские интеллектуальные технологии. - 3 (37) Т. 1 2017. - С. 56-61.
3. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. Глава 7. С.147-150.
4. Способ и устройство защиты от электрохимической коррозии сварной металлопродукции [Текст]: пат. 2571293 Рос. Федерация: МПК С23F 13/00 / Веревкин В.И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет». - № 2014105150/02; заявл.15.02.2014; опубл.20.12.15. Бюл. 35 - 23 с.
5. metal-archive.ru » Силицирование металлов и сплавов » Роль и причины влияния углерода на скорость силицирования.
6. Косарев, А.В. Природа положительной и отрицательной термоЭДС и её проявления в термоэлектрических эффектах. / А.В. Косарев, Н.А. Косарев // Научные труды 19-й Межвузовской Российской научной конференции "Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах". Балаково, Из-во СОО "АН ВЭ", 2018, С. 18-27.
7. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. - М.: Энергия, 1973. - 440 с.

References

1. Andreev, N. T. Ship repair [Text]: monograph / N. T. Andreev, O. A. Borchevsky, V. G. Lugovykh [et al.]. - L.: Shipbuilding, 1972. - 568 p.
2. Verevkin, V. I. influence of silicon content and deformation of welded joints from shipbuilding steels on their tendency to electrochemical corrosion (article) / V. I. Verevkin, V. F. Igyushev, S. A. Teryusheva. // Marine intelligent technologies. - 3 (37) Vol. 1 2017. - P. 56-61.
3. chemist's Handbook 21. Chemistry and chemical technology. Chapter 7. Pp. 147-150.

4. Method and device for protection against electrochemical corrosion of welded metal products [Text]: Pat. 2571293 ROS. Federation: IPC C23F 13/00 / Verevkin V. I.; applicant and patent holder Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Kaliningrad state technical University". - No. 2014105150/02; application 15.02.2014; publ. 20.12.15. Byul. 35 - 23 p.
5. metal-archive.ru "Silicification of metals and alloys" the role and causes of carbon influence on the rate of silicification.
6. Kosarev, A.V. The nature of positive and negative thermal EMF and its manifestations in thermoelectric effects. / A.V. Kosarev, N. A. Kosarev // Scientific papers of the 19th interuniversity Russian scientific conference "Vector energy in technical, biological and social systems". Balakovo, From sooo "An VE", 2018, Pp. 18-27.
7. Rotach V. Ya. Calculation of dynamics of industrial automatic control systems. - Moscow: Energiya, 1973. - 440 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Иванович Веревкин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной механики и технологии материалов, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: verevkinvi@mail.ru

Valery I. Verevkin, Dr. Sci. (Eng)., Professor, Professor of the Department of Engineering Mechanics and Materials Technology, Baltic State Academy of Fishing Fleet, 236029, Kaliningrad, st. Youth, 6, e-mail: verevkinvi@mail.ru

Валерий Федорович Игушев, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной механики и технологии материалов, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: Igushev_TMM@bga.gazinter.net

Valery F. Igushev, Ph.D. (Eng)., assistant professor, Head of the Department of Engineering Mechanics and Materials Technology, Baltic State Academy of Fishing Fleet, 236029, Kaliningrad, st. Youth, 6, e-mail: Igushev_TMM@bga.gazinter.net

Светлана Александровна Терюшева, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: sterjusheva@mail.ru

Svetlana A. Teryusheva Ph.D. (Chem)., assistant professor of the Department of Chemistry, Baltic State Academy of Fishing Fleet, 236029, Kaliningrad, st. Youth, 6, e-mail: sterjusheva@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 620.9

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.069

Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения морских устьевых портов

М.С. Харитонов¹, А.Ю. Никишин¹, И.Е. Кажекин¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В последние десятилетия наблюдается интенсивный рост морской торговли и увеличение объемов морских грузоперевозок, которые привели к развитию соответствующей береговой инфраструктуры. Развивающиеся морские порты в ряде случаев становятся центрами экономического роста прибрежных территорий. Из-за локализации негативных экологических факторов в портовом регионе особое значение приобретают проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития. Одним из эффективных методов снижения техногенного воздействия на экологию является замещение ископаемых видов топлива возобновляемыми источниками энергии, обеспечивающими электроэнергию для портовых операций и берегового питания морских судов. Однако для устьевых портов, как правило, характерны ограниченность территорий и пониженный потенциал возобновляемых ресурсов, в частности ветроэнергетики, в виду удаленности от прибрежных морских территорий. В статье на примере Калининградского морского торгового порта рассмотрены вопросы использования возобновляемых источников энергии для целей электроснабжения. Дана оценка потенциала солнечной и ветроэнергетики. Выполнен анализ системы электроснабжения порта и даны рекомендации по внедрению систем распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: морской порт, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, фотовольтаика, скорость ветра, система электроснабжения, микрогрид, режим нейтрали.

Problems of renewable energy sources integration in estuary marine ports power supply systems

Maxim S. Kharitonov¹, Andrey Y. Nikishin¹, Ilya E. Kazhekin¹¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. Recent decades have shown rapid growth of maritime trade and an increase in sea freight volumes, which led to the development of coastal infrastructure. Developing seaports in some cases become centers of economic growth in coastal areas. Due to the localization of negative environmental factors in the port region, problems of ensuring environmental safety and sustainable development are of particular importance. One of the effective methods to reduce the technogenic impact on the environment is the replacement of fossil fuels with renewable energy sources that provide electricity for port operations and onshore power supply of ships. However, estuarine ports have limited territories and a reduced potential of renewable resources, in particular wind energy, due to the remoteness from coastal marine territories. The article examines the use of renewable energy sources for power supply using the example of the Kaliningrad Sea Trade Port. An assessment of the potential of solar and wind energy is given. The analysis of the power supply system of the port was carried out and recommendations were given for the implementation of distributed generation systems based on renewable energy sources.

Key words: seaport, renewable energy sources, wind energy, photovoltaics, wind speed, power supply system, microgrid, neutral mode.

Введение

Среди основных положений стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 прослеживается курс на повышение устойчивости функционирования объектов морской индустрии, в том числе для обеспечения экологической безопасности Мирового океана в условиях воздействия техногенных факторов [1]. В качестве одного из инструментов для достижения поставленных целей имеет место использование возобновляемых источников энергии для замещения традиционных видов топлива в процессе производства энергии для обеспечения функционирования морских портов [2].

Особенностью устьевых портов является их относительная удаленность от морского побережья и, как следствие, от зон с высоким потенциалом ветровой и солнечной энергии. Из-за расположения в индустриальных зонах устьевые порты, как

правило, находятся в условиях застроенной среды, которая может рассматриваться в качестве элементов защищенности с позиции оценки ветропотенциала и причины формирования затененных областей, что негативно сказывается на потенциале энергии солнца. При этом обеспечение требуемой мощности генерации за счет масштабирования генерирующих установок зачастую затруднено ввиду отсутствия в промышленных районах свободных территорий.

В то же время современные технологии и методы построения систем микрогрид позволяют за счет комбинации различных технических решений обеспечить снижение доли ископаемых видов топлива в энергобалансе морских портов. К основным техническим мероприятиям относятся:

- использование возобновляемых источников для электроснабжения порта и берегового питания судов во время их стоянки в порту;

- перевод ряда операционных и технологических процессов в порту на использование электроэнергии и возобновляемых топлив;
 - повышение эффективности эксплуатации и надежности функционирования существующих систем электроснабжения.

1. Анализ инфраструктуры Калининградского морского торгового порта

Калининградский морской торговый порт (КМТП) является крупнейшим по объёму работ и технической оснащённости предприятием самого западного и единственного незамерзающего российского порта на Балтийском море. Порт располагается в юго-восточной части Балтийского моря в устье реки Преголя (рис. 1) и соединен с морем морским каналом протяженностью 43 км. Терминалы КМТП

расположены во внутренних гаванях (Вольной и Индустриальной) города Калининград (рис. 2) [3].



Рис. 1. Расположение Морского торгового порта на территории Калининградской области



Рис. 2. Территория Калининградского морского торгового порта

К основным видам деятельности КМТП относятся: погрузочно-разгрузочные работы, хранение грузов, складские и швартовые операции. На территории порта расположено 11 крытых складов, три здания элеваторов, два склада – холодильника для хранения рефрижераторных грузов глубокой заморозки, которые работают в круглосуточном режиме (табл. 1).

перегрузочный комплекс порта, включающий порталы краны, расположенные вдоль пристаней.

2. Оценка потенциала ветроэнергетических ресурсов

Ветроэнергетический потенциал территории определяется средней скоростью ветра на высоте оси ветроколеса и зависит от вертикального профиля ветра, как правило, рассчитываемого на основе математического выражения (1) по известной скорости ветра на некоторой базовой высоте [4].

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha, \quad (1)$$

где $V(z)$ – скорость ветра на высоте z над поверхностью земли; z_r – базовая высота над землей, используемая для построения профиля; α – показатель степени функции распределения, принимаемый равным 0,2 для модели нормального профиля ветра [4].

В общем случае помимо высоты над уровнем земли скорость ветра зависит от формы рельефа местности; удаленности от водной поверхности; степени открытости территории с учетом элементов защищенности. По данным информационной системы [5] для метеостанции 26702 [5] по расчетной

Таблица 1
 Данные по инфраструктуре порта

Параметр	Значение
Территория морского терминала, га	66,27
Акватория морского терминала, км ²	0,46
Количество причалов	15
Длина причального фронта, п.м.	2 650,75
Количество порталных кранов	38
Площадь крытых складов, тыс. м ²	46,8
Площадь открытых складов, тыс. м ²	231,4
Емкости резервуаров, тыс. тонн	9

В связи со спецификой деятельности наибольшей энергоёмкостью обладает производственно-

точке «Калининград (порт)» средняя скорость ветра на высоте 10 м составляет 1,7 м/с. Сравнительно невысокая скорость ветра обусловлена устьевым

расположением КМТП. В то же время прибрежные районы Калининградского залива и Балтийского моря имеют более высокий потенциал (рис. 3) [6].

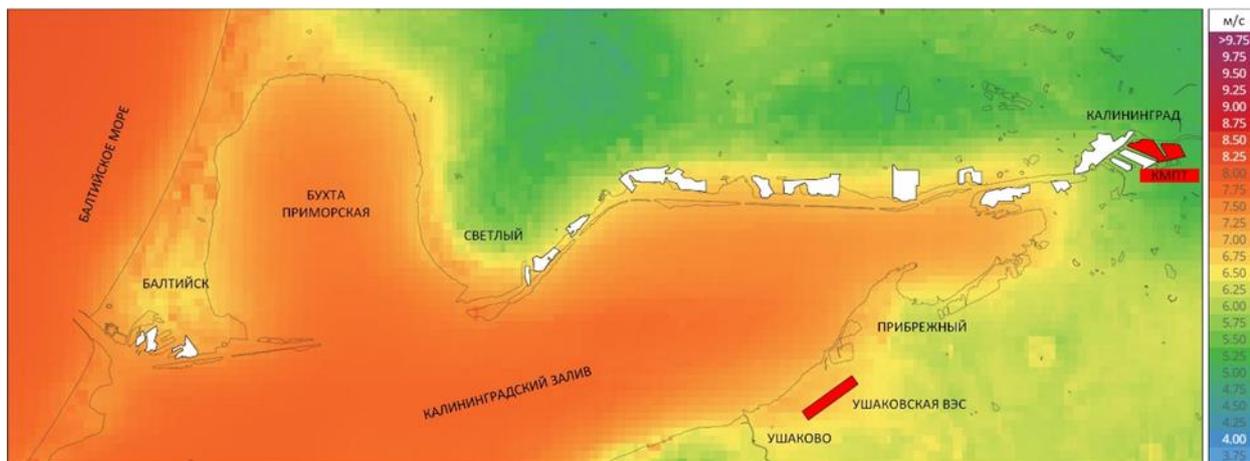


Рис. 3. Объекты портовой инфраструктуры на карте средней скорости ветра на высоте 50 м

В частности, на побережье Калининградского залива в пос. Ушаково (рис. 3) с 2018 года функционирует Ушаковская ВЭС в составе трёх ветроэнергетических установок Enercon E-70 (табл. 2) номинальной мощностью 2,3 МВт каждая, с фактическим ограничением мощности до 1,7 МВт.

Таблица 2

Технические характеристики ВЭУ Enercon E70

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	2 300
Стартовая скорость ветра, м/с	2,5
Номинальная скорость ветра, м/с	15
Максимальная скорость ветра, м/с	34
Высота башни, м	75
Диаметр ротора, м	71
Ометаемая площадь ветроколеса, м ²	3 959
Количество лопастей	3
Тип генератора	Синхронный

Следует отметить, что при средней скорости ветра на высоте 10 м в районе расположения Ушаковской ВЭС 5,45 м/с расчетная по выражению (1) скорость ветра на высоте оси ветроколеса составляет 8,2 м/с. В соответствии с рабочей характеристикой ВЭУ (рис. 4) [7] при данной скорости обеспечивается средняя мощность генерации на уровне 680 МВт, что соответствует коэффициенту использования установленной мощности (КУИМ) равному приблизительно 30%.

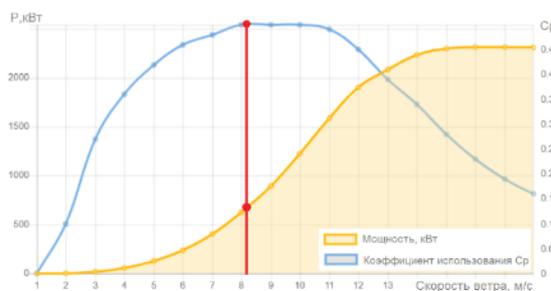


Рис. 4. Рабочая характеристика ВЭУ Enercon E70

Поскольку наклонный участок рабочей характеристики имеет нелинейный характер зависимости, то помимо усредненной величины скорости ветра во внимание необходимо принимать изменение фактической скорости ветра в течение года, получено на основе статистической обработки результатов метеорологических наблюдений или аналитическим способом на основе функций Рэля или Вейбулла. На рис. 5 представлены результаты анализа повторяемости скоростей ветра по данным статистики и расчетным данным для высоты оси ветроколеса применительно к району расположения КМТП. По данным диаграммы можно сделать вывод о преобладании скоростей ветра до 4 м/с, что применительно к современным ветроэнергетическим установкам соответствует низкому значению КУИМ.

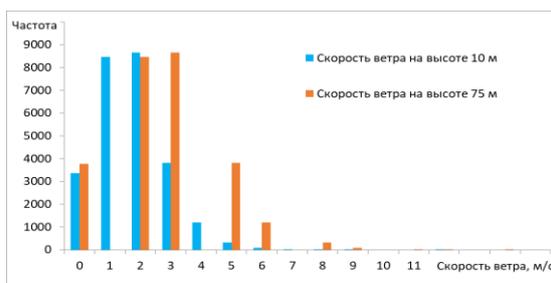


Рис. 5. Диаграммы повторяемости скорости ветра

Аналогичный вывод о сравнительно невысоком ветропотенциале в районе расположения КМТП можно сделать, анализируя расчетные графики зависимости скорости ветра от высоты (рис. 6).

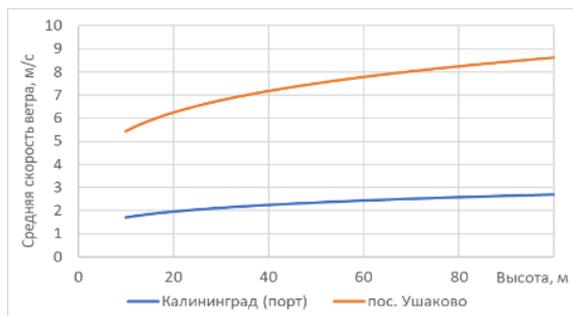


Рис. 6. Зависимость скорости ветра от высоты

3. Оценка потенциала солнечной энергетики

Распределение интенсивности солнечного излучения по территории Калининградской области имеет более равномерный характер в сравнении со средней скоростью ветра (рис. 7). Для района расположения КМТП средняя дневная сумма прямой солнечной радиации составляет 2,8 кВт·ч/м² [8].

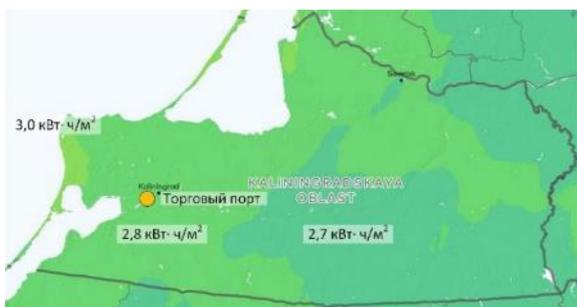


Рис. 7. Средняя дневная прямая солнечная радиация на территории Калининградской области

Использование фотоэлектрических панелей для производства электрической энергии требует наличия достаточных площадей для их размещения. В условиях устьевых портов, расположенных в застроенной индустриальной среде, в качестве площадок для размещения панелей успешно используются крыши портовых сооружений. Однако в северных широтах с учетом дополнительных снеговых нагрузок существующие кровельные конструкции могут не обладать достаточной несущей

способностью для восприятия расчетных нагрузок солнечных электростанций.

Проведенные теоретические изыскания, не учитывающие несущей способности кровельных конструкций, показывают, что при использовании солнечных панелей Hevel HVL-380/HJT мощностью 380 Вт с углом установки 38° при суммарной площади кровли 36,3 тыс. м² на крышах складов КМТП возможно разместить около 12 тыс. панелей общей установленной мощностью более 4,5 МВт.

Однако с учетом сезонного изменения количества дневной солнечной радиации объемы производимой солнечной электростанцией электроэнергии будут также изменяться (рис. 8). Согласно результатам расчетов при благоприятных условиях максимальное годовое производство электроэнергии за счет солнечной электростанции может достигать 3,5 млн. кВт·ч, что составляет 45,5% от энергопотребления КМТП по данным за 2018 год.

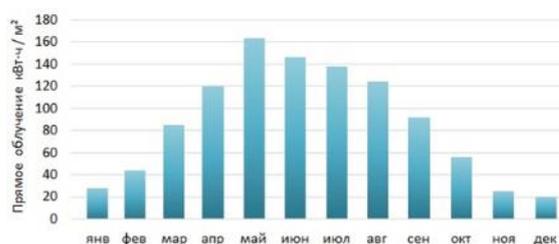


Рис. 8. Данные о суммарной прямой солнечной радиации в районе расположения КМТП

4. Интеграция возобновляемых источников энергии в рамках концепции микрогрид

В наиболее широком смысле система микрогрид представляет собой взаимосвязанные нагрузки и распределенные энергоресурсы, включая возобновляемые источники энергии, такие как ветровая и солнечная, которая действует как единый контролируемый объект по отношению к основной электрической сети, способный работать параллельно с сетью, так и изолированно (рис. 9). Последнее условие требует масштабного внедрения установок распределенной генерации, накопителей энергии и систем управления нагрузками.

С учетом вышесказанного реализация концепции микрогрид на базе существующих систем электроснабжения морских портов требует наличия развитой электросетевой инфраструктуры для выдачи мощности установок распределенной генерации, интеллектуального контроля и учета, адресного управления энергопотреблением.

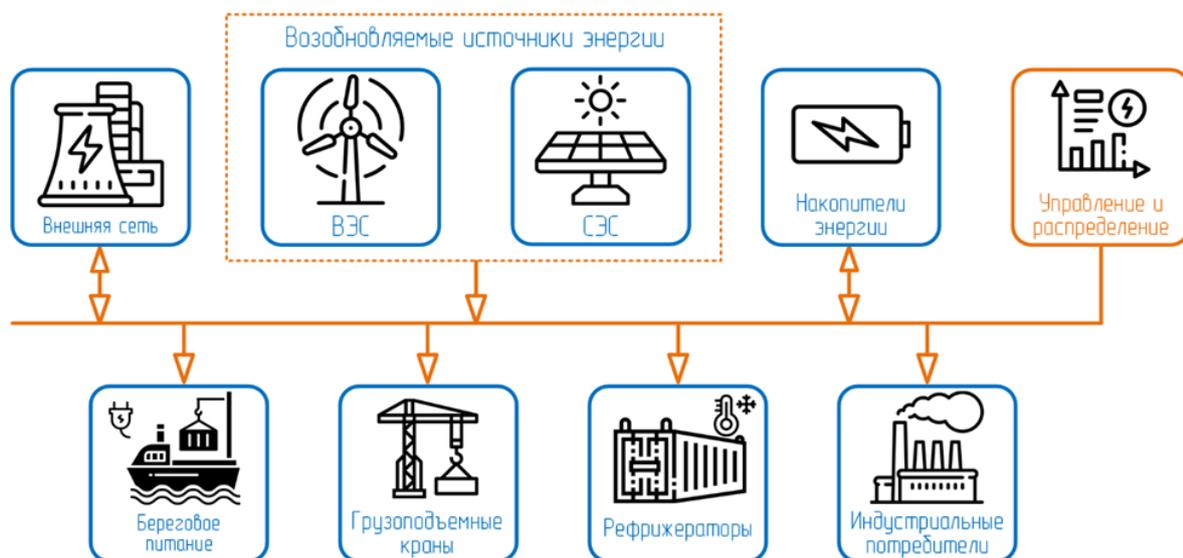


Рис. 9. Структурная схема системы микрогрид применительно к морскому порту

Анализ системы электроснабжения КМТП показывает, что на территории порта присутствуют две развитые подсистемы 10 и 0,4 кВ, построенные на основе 16 трансформаторных подстанций. Электрические связи на напряжении 10 кВ общей протяженностью более 10 км выполнены по смешанному принципу путем формирования кольцевых участков с двухсторонним питанием для обеспечения надежного электроснабжения (рис. 10).

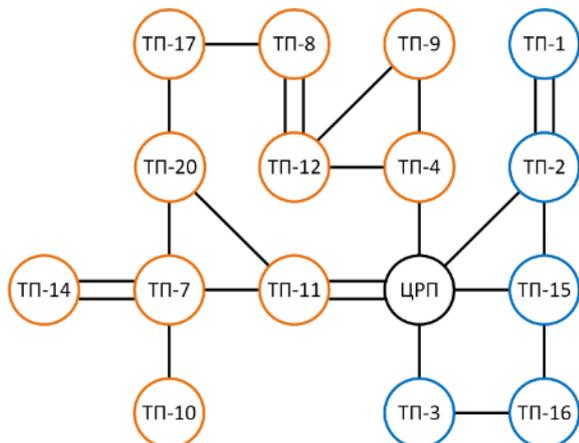


Рис. 10. Структура системы электроснабжения КМТП (цветом обозначены участки, территориально «разделенные» Вольной гаванью)

На трансформаторных подстанциях установлено 23 силовых трансформатора, десять из которых в настоящее время находятся в резерве, создавая предпосылки для увеличения мощностей и перераспределения потоков мощности при интеграции возобновляемых источников энергии.

Поскольку концепция микрогрид предполагает возможность автономной работы системы электроснабжения порта, то в условиях отключения от основной сети актуальным становится вопрос по обоснованию режима нейтрали с целью уменьшения токов однофазных замыканий, в результате чего исчезает необходимость использования заземления нейтрали через дугогасящий реактор. Особую

актуальность это приобретает при работе микрогрид морских портов в условиях повышенной влажности.

Согласно ПУЭ для электросетей с малыми токами однофазных замыканий рекомендуются режимы изолированной нейтрали и нейтрали, заземленной через резистор. Сопоставляя эти варианты, следует отметить некоторые преимущества резистивного заземления нейтрали.

Как известно, в сетях с резистивной нейтралью устраняются колебательные процессы после гашения заземляющей дуги, что приводит к снижению дуговых перенапряжений как в сравнении с электросетью с изолированной нейтралью, так и с электросетью, в которой используется дугогасящий реактор. Снижение напряжения смещения нейтрали в бестоковые паузы при помощи резистора, включенного в нейтраль, приводит не только к уменьшению максимальных кратностей перенапряжений в системе электроснабжения порта, но и к ослаблению интенсивности горения дуги. На рис. 11 приведена схема экспериментальной установки, при помощи которой исследовались процессы формирования перенапряжений.

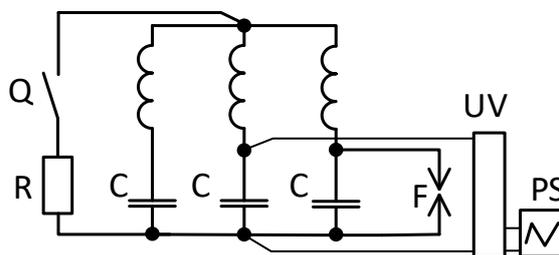


Рис. 11. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка позволяет воспроизвести процессы как при изолированной нейтралью (Q отключен), так и при резистивной нейтрали (подключен резистор R). Неустойчивое замыкание одной из фаз осуществлялось при помощи воздушного искрового промежутка F. При этом осциллографом PS, подключенным через делитель UV, регистрировалось напряжение на здоровой фазе. Кратности зарегистрированных

перенапряжений относительно амплитуды фазного напряжения приведены на рис. 12.

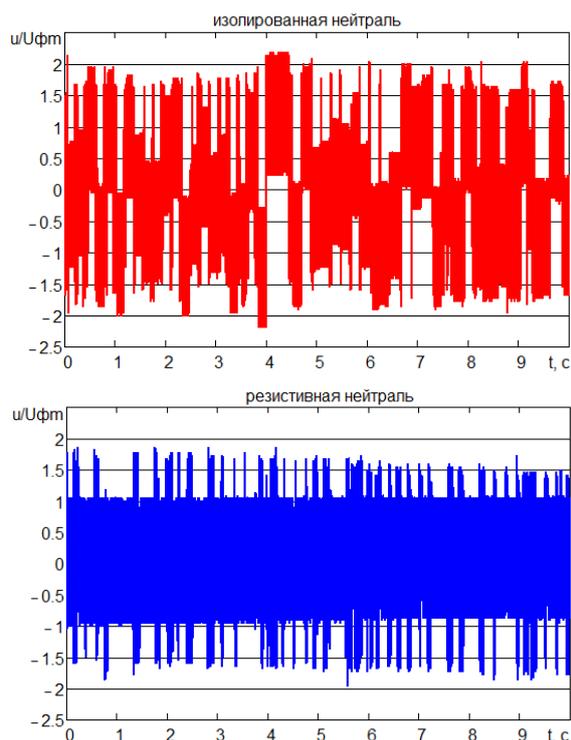


Рис. 12. Осциллограммы напряжения неповрежденной фазы в сетях с изолированной и резистивной нейтралью

Анализ данных рис. 12 показывает, что в автономной сети с изолированной нейтралью замыкания сопровождаются большими выбросами напряжения, а после гашения дуги напряжение на фазах смещается по постоянному потенциалу, в результате чего увеличивается интенсивность дуговых процессов. Это способствует быстрому развитию однофазных замыканий в более опасные повреждения, требующие немедленного отключения

участка автономной сети, что, приводит к созданию неблагоприятных условий для работы микрогрид.

При переводе электросети из режима изолированной нейтрали в режим резистивного ее заземления число замыканий значительно уменьшается. Несмотря на некоторое повышение установившегося тока однофазного замыкания дуговые процессы становятся менее опасны. К тому же, активная составляющая тока нулевой последовательности, формирующаяся при резистивной нейтрали, протекает только на участке электросети между устройством заземления нейтрали и местом повреждения. Это существенно повышает селективность защиты от однофазных замыканий.

С учетом вышесказанного заземление нейтрали через резистор представляется наиболее предпочтительным для систем микрогрид в автономном режиме работы, поскольку позволяет одновременно обеспечить снижение воздействий на изоляцию и упростить поиск мест ее повреждений.

Заключение

Рассмотренные тренды развития морской индустрии свидетельствуют о перспективе перехода деятельности морских портов в формат «зеленых» технологий для выполнения новых требований в области экологии и энергоэффективности.

Однако для устьевых портов переход к использованию возобновляемых источников энергии сопряжен с рядом технических вызовов ввиду их территориальной удаленности от районов с высоким энергетическим потенциалом.

В то же время устьевые порты, располагаясь в индустриальных районах, как правило, имеют развитую электросетевую инфраструктуру, которая является основой для построения систем микрогрид, позволяющих за счет использования накопителей энергии и управления нагрузками обеспечить устойчивое развитие морских портов при интеграции возобновляемых источников энергии.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ «О Стратегии развития морской деятельности в РФ до 2030 года»
2. Заостровских Е. А. «Зеленые порты» северо-восточной Азии: тенденции, проблемы и пути совершенствования // Новая азиатская политика и развитие Дальнего Востока. – С. 194.
3. Калининградский морской торговый порт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kscsport.ru>
4. ГОСТ Р 54418.1-2012 (МЭК 61400-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования
5. Архив погоды метеостанции 26702 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rp5.ru>
6. Global wind atlas [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globalwindatlas.info>
7. Overview of ENERCON platform [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.enercon.de/products/>
8. Global solar atlas [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globalsolaratlas.info>

References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF «O Strategii razvitiya morskoy deyatel'nosti v RF do 2030 goda» [Government directive on the strategy of Russian marine activities development up to 2030]
2. Zaostrovskikh E. A. «Zelenye porty» severo-vostochnoy Azii: tendentsii, problemy i puti sovershenstvovaniya [Green ports in north-west Asia: trends, problems and ways for development]. Novaya aziatskaya politika i razvitie Dal'nego Vostoka. S.194.
3. Kaliningradskiy morskoy torgovyy port [Kaliningrad trade marine port], <http://kscsport.ru>
4. GOST R 54418.1-2012 Vozobnovlyayemaya energetika. Vetroenergetika. Ustanovki vetroenergeticheskie. Chast' 1. Tekhnicheskie trebovaniya [Standard on technical aspects of wind turbines for renewable energy applications]
5. Arkhiv pogody meteostantsii 26702 [Weather archive data], <https://rp5.ru>
6. Global wind atlas, <https://globalwindatlas.info>

7. Overview of ENERCON platform, <https://www.enercon.de/products/>
8. Global solar atlas, <https://globalsolaratlas.info>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максим Сергеевич Харитонов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1 e-mail: maksim.haritonov@klgtu.ru

Андрей Юрьевич Никишин, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: nikduke@mail.ru

Илья Евгеньевич Кажекин, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Maxim S. Kharitonov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: maksim.haritonov@klgtu.ru

Andrey Y. Nikishin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: nikduke@mail.ru

Ilya E. Kazhekin, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: kazhekin@mail.ru

УДК 629.127 (621.165)

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.070

Определение расходных характеристик сопловых аппаратов со сверхзвуковыми осесимметричными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин

Р.Р. Симашов¹, С.В. Чехранов¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация. В работе приводятся обобщающие зависимости коэффициентов расхода сопловых аппаратов со сверхзвуковыми осесимметричными соплами в широком диапазоне изменения определяющих геометрических и режимных параметров. Предложена двухпараметрическая функция, учитывающая влияние расположения сопел в сопловом аппарате и степени конфузорности дозвуковой части осесимметричного сопла на коэффициент расхода. Показано слабое влияние на коэффициент расхода относительного радиуса закругления стенки в узкой части сопла и относительной длины дозвуковой части сопла в области их оптимальных значений определенных по минимуму потерь кинетической энергии. Переменные режимы работы сопла учитываются зависимостью относительного коэффициента расхода в функции от числа Рейнольдса в критическом сечении сопла. Полученные в работе эмпирические зависимости позволяют использовать их при моделировании переменных режимов и многорежимной оптимизации малорасходных турбин.

Ключевые слова: малорасходные турбины, переменные режимы, коэффициенты расхода, сопловые аппараты, сверхзвуковые осесимметричные сопла.

Determination of mass flow characteristics of supersonic axisymmetric nozzle diaphragms in modeling variable duties of low-consumption turbines

Rafail R. Simashov¹, Sergei V. Chekhranov¹¹Far Eastern State Technical Fisheries University, Russian Federation

Abstract. The research presents generalizing dependences of mass flow rates in supersonic axisymmetric nozzle diaphragms in a wide range of variation of the governing geometric and operating parameters. A two-parameter function is proposed that takes into account the influence of the location of the nozzles in the nozzle apparatus and the degree of compression of the flow of the subsonic part of the nozzle on the mass flow rate. It is shown that the relative radius of rounding of the nozzle wall in the vicinity of the throat section and the relative length of the subsonic part of the nozzle in the region of their optimal values determined by the minimum of kinetic energy losses have a weak effect on the flow rate. Variable duties of nozzle operation are taken into account by the dependence of the relative flow rate as a function of the Reynolds number in the throat of the nozzle. The empirical dependences obtained in this work make it possible to use them in modeling variable modes and multi-mode optimization of low-consumption turbines.

Key words: low-consumption turbines, variable duties, mass flow rate, nozzle diaphragms, supersonic axisymmetric nozzles.

Введение

Исследованию газодинамических характеристик сверхзвуковых сопел турбин посвящено значительное число работ, однако, обобщения экспериментальных данных по расходным характеристикам сверхзвуковых сопловых аппаратов (СА) с осесимметричными соплами (ОС) позволяющими использовать их для расчета переменных режимов работы МРТ при решении задачи МО, авторам неизвестны.

Так в работе [1] приводятся графические зависимости для определения коэффициента расхода одиночного сопла в функции от относительного радиуса закругления стенки в узкой части сопла $R/r_{кр}$ и числа Рейнольдса в критическом сечении $Re_{кр}$. Воспользоваться этими зависимостями при расчете МРТ не представляется возможным, так как получены они при исследовании ракетных сопел и расчет по ним для сопел МРТ дает завышенные значения коэффициента расхода $\mu_{ос} \approx 1$ (параметр $R/r_{кр}$ принимался равным 1, при автомодельном числе Рейнольдса). Тогда как коэффициенты расхода СА малорасходных турбин (при тех же условиях) лежат в пределах 0.9 ... 0.98. Что объясняется существенным влиянием

масштабного фактора, особенностями компоновки сопел в СА и условиями подвода к ним рабочего тела.

В работах [2, 3, 4, 5], в которых приводятся исследования и рекомендации по выбору коэффициента расхода одиночных осесимметричных сопел $\mu_{ос}$ и СА с ОС $\mu_{са}$ малорасходных турбин, не приводится каких-либо обобщений опытных данных в зависимости от основных влияющих параметров, а лишь указывается абсолютный уровень $\mu_{ос}$ ($\mu_{са}$) который следует применять в расчетах при проектировании новой МРТ для данного типа дозвуковой части сопла (профилированная, непрофилированная). Однако приведенные в работах [2, 4, 5] рекомендации по профилированию дозвуковой части осесимметричного сопла и организации подвода рабочего тела к СА с ОС, а также содержащиеся в этих и других работах опытные данные позволяют применяя к ним подход изложенный в [6] обобщить эти данные и получить на их основе эмпирическую зависимость для определения $\mu_{са}$.

1. Обобщения экспериментальных данных по коэффициентам расхода СА с ОС

Анализ работ [1, 2, 4, 5, 7] показал, что коэффициент расхода μ_{ca} СА с ОС зависит от геометрических характеристик дозвуковой части сопла параметров рабочего тела в критическом сечении и компоновки сопел в СА. Коэффициент расхода СА с соплами дозвуковая часть которых описана кривыми второго порядка может быть описан функцией от следующих параметров:

$$\mu_{ca} = \mu(R/r_{кр}, l_{ex}/r_{кр}, \bar{n}_{ex}, \bar{\Delta}_{min}, Re_{кр}, \Gamma), \quad (1)$$

где $\bar{n}_{ex} = (d_{ex}/d_{кр})^2$ – степень конфузности дозвуковой части сопла; d_{ex} – входной диаметр дозвуковой части сопла; R – радиус закругления стенки в узкой части сопла; l_{ex} – длина дозвуковой части сопла; $r_{кр}$ – радиус критического сечения сопла; $\bar{\Delta}_{min}$ – относительное минимальное расстояние между входными эллипсами сопел СА; $Re_{кр}$ – число Рейнольдса в критическом сечении сопла, Γ – множество конструктивно-типовых параметров (форма дозвуковой части и тип СА – с тангенциальным подводом рабочего тела).

Разделим, согласно изложенному в [6] подходу, независимые параметры $R/r_{кр}$, $l_{ex}/r_{кр}$, \bar{n}_{ex} , $\bar{\Delta}_{min}$, $Re_{кр}$, Γ на две группы. К первой группе отнесем параметры $R/r_{кр}$, $l_{ex}/r_{кр}$, Γ . Для них можно указать область оптимальных значений, в пределах которой, обеспечивается высокий уровень коэффициента расхода μ_{ca} СА с ОС и слабое их влияние на расходную характеристику. Ко второй группе отнесем параметры \bar{n}_{ex} , $\bar{\Delta}_{min}$, $Re_{кр}$, которые будем называть определяющими и в зависимости, от которых будем искать функциональную зависимость для μ_{ca} .

Необходимость учета влияния числа $Re_{кр}$ на коэффициент μ_{ca} для задач многорежимной оптимизации очевидна. Так как при отыскании рациональной программы регулирования меняются условия на входе в МРТ, что в свою очередь приводит к изменению параметров в критическом сечении и к изменению μ_{ca} . Заметим, что от точности расчета μ_{ca} зависят основные характеристики МРТ, которые являются входными параметрами для задачи многорежимной оптимизации и от которых зависит результат оптимизационного поиска: мощность и внутренний КПД турбины – для обеспечения графика нагрузки турбины; расход – для определения ФЦ [8].

Для параметров \bar{n}_{ex} , $\bar{\Delta}_{min}$ нельзя указать области как для параметров первой группы, что связано со спецификой компоновки сопел в сопловом аппарате МРТ и спецификой применения МРТ. В зависимости от условий на входе в МРТ (температура и давление) сопла в таких МРТ могут располагаться с любым из возможных значений

степени перерезывания τ в области изменения от 0.12 до $-\infty$. Между параметрами $\bar{\Delta}_{min}$ и τ имеется строгая функциональная зависимость, т.е. изменение τ в указанном диапазоне ведет к изменению $\bar{\Delta}_{min}$ в диапазоне от 0 ... $+\infty$. Эта зависимость описывается выражением

$$\bar{\Delta}_{min} = \Delta_{min} \sin \alpha_{1к} / d_{ex},$$

где Δ_{min} – минимальное расстояние между эллипсами входа СА определяется по приближенной формуле

$$\begin{aligned} \Delta_{min} = & \left[\left[\left(\frac{d_1 - d_{кр}}{2 \operatorname{tg}(\theta/2)} + \frac{d_1}{2 \operatorname{tg} \alpha_{1к}} + 2d_{кр} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \frac{d_{ex}}{2 \operatorname{tg} \alpha_{1к}} \right) \cos \alpha_{1к} + \frac{d_{ex}}{2 \sin \alpha_{1к}} + \frac{\Delta t_1}{2} \right] \operatorname{tg} \gamma - \right. \\ & \left. - \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma \left(\frac{d_{ex}}{2 \sin \alpha_{1к}} \right)^2 + \left(\frac{d_{ex}}{2} \right)^2 - \frac{d_{ex}}{2 \cos \gamma}} \right] \cos \gamma; \\ & \gamma = \left(\frac{d_1}{\sin \alpha_{1к}} + \Delta t_1 \right) / (D_{cp} / 2), \text{ (рад)}. \end{aligned}$$

Как показывает анализ работ [2, 4, 5, 9, 10.] для ОС с профилированной дозвуковой частью наблюдается рост коэффициента расхода μ_{ca} с увеличением \bar{n}_{ex} с последующим выходом на горизонтальную асимптоту при достижении значений $\approx 6 \dots 10$. Т.е. можно было бы принять $\bar{n}_{ex} \approx 6 \dots 10$ и этим исключить данный параметр из группы определяющих, однако при малых углах косога среза ($\alpha_{1к} = 12 \dots 15$) и небольшой перемычке между соплами может оказаться невозможным выполнить компоновку сопел с $\bar{n}_{ex} \approx 6 \dots 10$ в СА (возможно перерезывание соседних сопел или невыполнение условия прочности).

Таким образом, зависимость для μ_{ca} будем искать в виде функции от трех параметров:

$$\mu_{ca} = \mu(\bar{n}_{ex}, \bar{\Delta}_{min}, Re_{кр}). \quad (2)$$

Влияние взаимного расположения осесимметричных сопел в СА на коэффициент расхода исследовалось в работе [4]. Взаимное расположение сопел со стороны входа в данной работе предлагается характеризовать относительной величиной минимального расстояния между входными эллипсами (рис. 1): $\bar{\Delta}_{min} = \Delta_{min} / l_{ex}$, где l_{ex} – большая ось эллипсов входа. Экспериментальные зависимости μ_{ca} от $\bar{\Delta}_{min}$ двух типов СА с ОС отличающихся друг от друга степенью поджатия потока на входе в сопла представлены на рис. 3. Такой же характер зависимости $\mu_{ca} = (\bar{\Delta}_{min})$ получен и для СА с ОС с $f_c = 1.0$, что подтверждает возможность оценивать влияние взаимного расположения сопел на μ_{ca} данным геометрическим параметром ($\bar{\Delta}_{min}$).

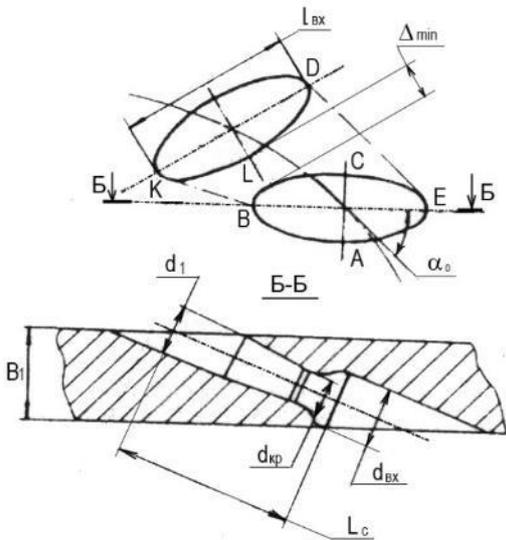


Рис. 1. Схема расположения осесимметричных сопел в сопловом аппарате

Характер поведения кривых $\mu_{са} = (\bar{\Delta}_{min})$ хорошо согласуется с теоретическим анализом течения рабочего тела на входе в сопловый аппарат с тангенциальным подводом [4]. При достаточно большом удалении входных эллипсов друг от друга отсутствует их взаимное влияние и течение на входе в сопла аналогично одиночному соплу. При достижении определенного минимального расстояния между эллипсами входа начинает сказываться взаимодействие потоков в непосредственной близости от входных эллипсов СА, которое приближает направление движения

рабочего тела перед входом в СА к оси сопел (рис. 2), что ведет к увеличению $\mu_{са}$. При дальнейшем уменьшении расстояния между входными эллипсами происходит перестройка потока и уменьшение практически всех вихревых зон (I-IV, VI, VII, рис. 2), так как угол поворота потока уменьшается и на пути движения рабочего тела отсутствуют острые кромки, что приводит к возрастанию $\mu_{са}$. Однако взаимодействие потоков сопровождается и определенными потерями. Возрастание этих потерь при дальнейшем уменьшении $\bar{\Delta}_{min}$ и приводит к стабилизации роста коэффициента расхода.

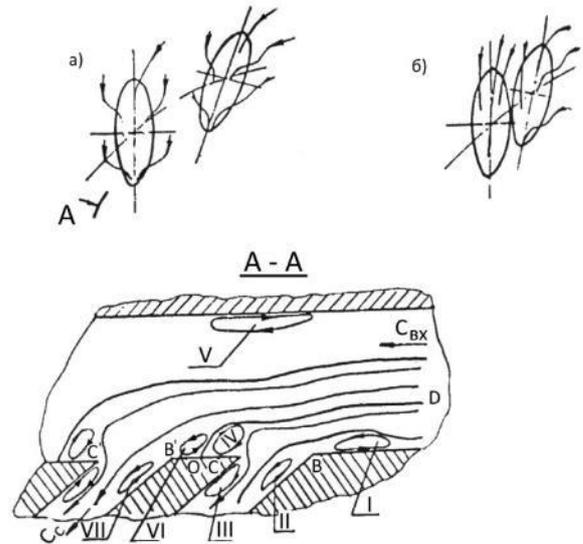


Рис. 2. Схема течения в предсопловом объеме

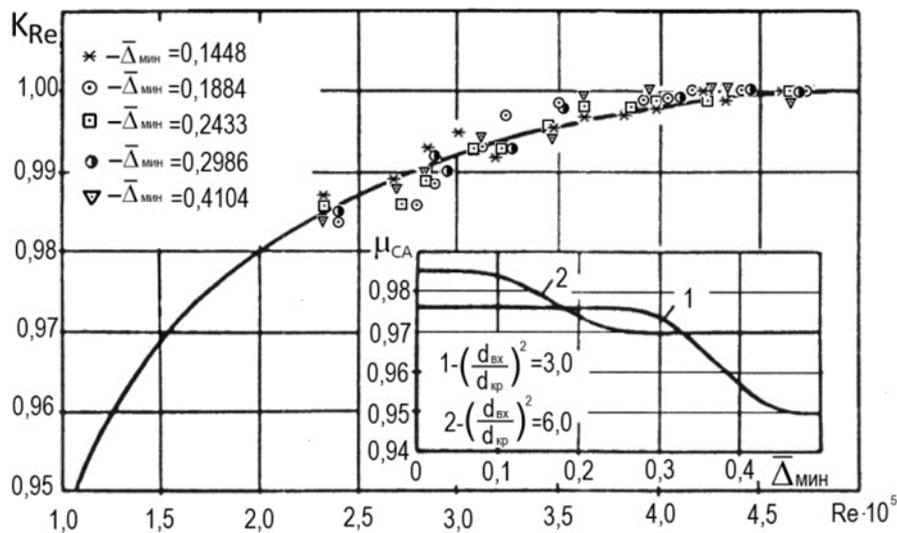


Рис. 3. Зависимость коэффициента расхода СА с ОС от параметров $\bar{n}_{вх}$, $\bar{\Delta}_{min}$ и числа $Re_{кр}$.

Как видно из рис. 3 уменьшение $\bar{n}_{вх}$ приводит к снижению коэффициента расхода $\mu_{са}$ при малых $\bar{\Delta}_{min}$ и к более глубокому падению его при дальнейшем увеличении параметра $\bar{\Delta}_{min}$. Это связано с тем, что при прочих равных условиях

(расходы рабочего тела равны; скорости в подводящем устройстве также равны) уменьшение $\bar{n}_{вх}$, приводит к увеличению скорости рабочего тела в цилиндрических каналах СА, подводящих рабочее тело к соплам. Что в свою очередь ведет к увеличению потерь от внезапного расширения в окрестностях точек В и В' и внезапного сужения в

окрестностях точек С и С' (рис. 2). Следовательно, раньше начнется взаимодействие потоков и интенсификация потерь, вызванных этим взаимодействием.

Влияние числа $Re_{кр}$ на коэффициент расхода одиночного сопла и соплового аппарата с ОС различно. Так в работах [2, 5] влияние числа $Re_{кр}$ на коэффициент расхода одиночного сопла с осевым подводом рабочего тела не обнаружено в диапазоне его изменения $Re_{кр} > 1.07 \cdot 10^5$, тогда как для СА с ОС автомодельность наступает при $Re_{кр} \approx (4.5...7.0) \cdot 10^5$ [4, 10]. Более сильное влияние числа $Re_{кр}$ на коэффициент расхода $\mu_{са}$ связано с особенностью компоновки сопел в СА и условиями подвода к ним рабочего тела. Поэтому для учета влияния числа $Re_{кр}$ на $\mu_{са}$ воспользуемся опытными данными для СА с ОС представленными в работах [4, 10].

Влияние масштабного фактора ($d_{кр}$) на коэффициент расхода $\mu_{са}$ по имеющимся в

$$\mu'_{са} = \begin{cases} K_1 \cos(K_2[|K_3| + K_3]) + K_4, & \bar{\Delta}_{min} < |K_3| \\ K_1 \cos(K_2[\bar{\Delta}_{min} + K_3]) + K_4, & |K_3| \leq \bar{\Delta}_{min} \leq \frac{\pi}{K_2} + |K_3|, \\ K_1 \cos(K_2[\frac{\pi}{K_2} + |K_3| + K_3]) + K_4, & \bar{\Delta}_{min} > \frac{\pi}{K_2} + |K_3| \end{cases} \quad (4)$$

где

$$K_1 = 0.0185 - 0.00183 \bar{n}_{ex}; \quad K_2 = 13 + 0.33333 \bar{n}_{ex}; \quad K_3 = -(0.425 - 0.05833 \bar{n}_{ex}); \quad K_4 = 0.9485 + 0.00483 \bar{n}_{ex}.$$

При получении функции (4) сделано допущение о линейном характере зависимости $\mu_{са}$ от параметра \bar{n}_{ex} в диапазоне его изменения 3 ... 10. Как следует из приведенного теоретического анализа и представленных опытных данных увеличение \bar{n}_{ex} до значений $\approx 6 \dots 10$ приводит к предельнодостижимым коэффициентам расхода $\mu_{са}$ для СА с ОС равным коэффициентам расхода одиночных сопел с той же геометрией при осевом подводе рабочего тела, и независимости $\mu_{са}$ от параметра $\bar{\Delta}_{min}$ при тангенциальном подводе рабочего тела. Этот результат подтверждается также исследованиями, представленными в работе [11] для СА микротурбин. Расчет по (4) при $\bar{n}_{ex} = 10$ дает значение $\mu_{са} = 0.99$ во всем диапазоне изменения $\bar{\Delta}_{min}$ что совпадает с данными работы [5] и подтверждает правомочность сделанного допущения.

Опытные данные работ [4, 10] отражающие влияние числа $Re_{кр}$ представлены на рис. 3 в виде зависимости поправочного коэффициента $K_{Re}(Re_{кр})$. Экспериментальные точки для

литературе данным [2, 4, 5, 9, 10, 11] проявляется слабо, и вплоть до значений $d_{кр} \approx 2.0 \dots 3.0$ им можно пренебречь, так как изменение $\mu_{са}$ не превышает погрешности эксперимента.

2. Эмпирические зависимости коэффициента расхода осесимметричных сверхзвуковых сопел

Проведенный анализ экспериментальных данных работ [4, 10] показал, что общую зависимость $\mu_{са}$ (2) можно представить в виде:

$$\mu_{са} = \mu'_{са} \cdot K_{Re}, \quad (3)$$

где K_{Re} – коэффициент учитывающий влияние числа $Re_{кр}$; $\mu'_{са}$ – двухпараметрическая зависимость $\mu_{са}$ от \bar{n}_{ex} и $\bar{\Delta}_{min}$ в области автомодельности по числу $Re_{кр}$.

Двухпараметрическая зависимость $\mu'_{са} = \mu(\bar{n}_{ex}, \bar{\Delta}_{min})$ представлена на рис. 3 и хорошо аппроксимируется следующей составной функцией:

различных значений $\bar{\Delta}_{min}$ и \bar{n}_{ex} ($\bar{n}_{ex} = 3$ и 6) хорошо группируются вокруг одной кривой аппроксимация которой имеет вид

$$K_{Re} = \frac{1}{\frac{0.07238}{(Re_{кр} \cdot 10^{-5})} + 0.9837} \quad (5)$$

Заключение

Полученные эмпирические зависимости (4) и (5) отражают влияние на коэффициент расхода в СА с ОС определяющих параметров \bar{n}_{ex} , $\bar{\Delta}_{min}$, $Re_{кр}$ и могут быть применены при расчете переменных режимов при решении задач многорежимной оптимизации МРТ.

Зависимости (4) и (5) адекватны в интервале изменения основных влияющих параметров $\bar{n}_{ex} = 3 \dots 10$, $\bar{\Delta}_{min} = 0 \dots \infty$, $1 \leq R/r_{кр} \leq 2$, $2 \leq l_{ex}/r_{кр} \leq 3$ и соответствуют СА с тангенциальным подводом рабочего тела к соплам, со скоростью течения во входном устройстве $C_{ex} \leq 40$ м/с [4].

Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Том 1. М.: Наука, 1991. 600 с.
2. Виноградов Л.В. Исследование сверхзвуковых осесимметричных сопел и аппаратов турбин: Дис. ... канд.

- техн. наук. М.: УДН, 1975. 153 с.
3. Емин О.Н., Зарицкий С.П. Воздушные и газовые турбины с одиночными соплами. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
 4. Раков Г.Л. Аэродинамическое совершенствование малорасходных турбин: Дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1982. 137 с.
 5. Юсупов Э.М. Исследование некоторых методов повышения КПД одновенечных сверхзвуковых парциальных турбин: Дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛКИ, 1970. 168 с.
 6. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми осесимметричными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Морские интеллектуальные технологии. № 3(33) Т.1. 2016. С. 173-180.
 7. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
 8. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Многорежимная оптимизация сверхзвуковых малорасходных турбин в составе энергетических установок автономных подводных аппаратов. Морские интеллектуальные технологии. № 3(33) Т.1. 2016. С. 187-193.
 9. Кириллов И.И., Родин К.Г. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов малоразмерных турбин. Труды V Всесоюзной науч.-техн. конф. по микроэнергетике: Вопросы проектирования и доводки малоразмерных ГТД. Куйбышев, 1975. С.176-181.
 10. Родин К.Г., Носов В.В., Раков Г.Л. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с цилиндрическими соплами парциальных сверхзвуковых турбин. Изв. ВУЗов. Энергетика. № 4. 1981. С. 106-109.
 11. Наталевич А.С. Воздушные микротурбины. М.: Машиностроение, 1979. 268 с.

References

1. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Tom 1. М.: Nauka, 1991. 600 s.
2. Vinogradov L.V. Issledovanie sverkhzvukovykh osesimmetrichnykh sopel i apparatov turbin [Research of supersonic axisymmetric nozzles and turbine apparatuses]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. М.: UDN, 1975. 153 s.
3. Emin O.N., Zaritskiy S.P. Vozdushnye i gazovye turbiny s odinochnymi soplami [Air and gas turbines with single nozzles]. М.: Mashinostroenie, 1975. 216 s.
4. Rakov G.L. Aerodinamicheskoe sovershenstvovanie maloraskhodnykh turbin [Aerodynamic improvement of low-consumption turbines]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LPI, 1982. 137 s.
5. Yusupov E.M. Issledovanie nekotorykh metodov povysheniya KPD odnovenechnykh sverkhzvukovykh partsial'nykh turbin [Research of some methods for increasing the efficiency of single-walled supersonic partial turbines]: Dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: LKI, 1970. 168 s.
6. Simashov R.R., Chekhranov S.V. Opredelenie gazodinamicheskikh kharakteristik soplovykh apparatov s sverzhzvukovymi osesimmetrichnymi soplami pri modelirovani peremennykh rezhimov maloraskhodnykh turbin [Determination of gas-dynamic behaviour of supersonic axisymmetric nozzle diaphragm in designing of varying duty of low-consumption turbines]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. № 3(33) T.1. 2016. S. 173-180.
7. Deych M.E. Tekhnicheskaya gazodinamika [Engineering gas dynamics]. М.: Energiya, 1974. 592 s.
8. Simashov R.R., Chekhranov S.V. Mnogorezhimnaya optimizatsiya sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbin v sostave energeticheskikh ustanovok avtonomnykh podvodnykh apparatov [Multimode optimization of supersonic low-consumption turbines as part of power units of autonomous underwater vehicles]. Morskije intellektual'nye tekhnologii. № 3(33) T.1. 2016. S. 187-193.
9. Kirillov I.I., Rodin K.G. Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov malorazmernykh turbin [Gas-dynamic characteristics of small-size turbine nozzles]. Trudy V Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konf. po mikroenergetike: Voprosy proektirovaniya i dovodki malorazmernykh GTD. Kuybyshev, 1975. S.176-181.
10. Rodin K.G., Nosov V.V., Rakov G.L. Gazodinamicheskie kharakteristiki soplovykh apparatov s tsilindricheskimi soplami partsial'nykh sverkhzvukovykh turbin [Gas-dynamic characteristics of nozzle devices with cylindrical nozzles of partial supersonic turbines]. Izv. VUZov. Energetika. № 4. 1981. S. 106-109.
11. Natalevich A.S. Vozdushnye mikroturbiny [Air microturbines]. М.: Mashinostroenie, 1979. 268 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

УДК 621.515

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.071

Экспериментальное исследование структуры газового потока в криволинейных каналах переменного сечения

С.В. Чехранов¹, Р.Р. Симашов¹¹Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

Аннотация Целью работы является изучение влияния степени конфузности и радиусов кривизны на структуру потока и уровень потерь кинетической энергии в единичных криволинейных каналах. Такое исследование проводится в связи с тем, что межлопаточные каналы малорасходных турбин с большим углом поворота потока в рабочем колесе оказывают определяющее влияние на к.п.д. турбин такой конструкции. Поэтому для исследования выбраны каналы прямоугольного сечения с углом поворота потока 167 град. при степени конфузности 0,5 и 0,7. При использовании в качестве рабочего тела воздуха результаты исследования показали, что уровень потерь кинетической энергии тем ниже, чем меньше значение степени конфузности и меньше радиус кривизны. А исследование структуры потока показало, что увеличение радиуса кривизны приводит к смыканию вторичных вихрей и увеличению протяженности поверхности трения, что и является причиной возрастания потерь энергии в каналах с повышенным радиусом кривизны.

Ключевые слова: Малорасходные турбины, криволинейные каналы, отрыв потока, пограничный слой

Experimental study of the structure of a gas flow in curvilinear channels of variable cross-section

Sergei V. Chekhranov¹, Rafail R. Simashov¹,¹Far Eastern State Technical Fisheries University

Abstract. The aim of this work is to study the influence of the degree of confusion and radii of curvature on the flow structure and the level of kinetic energy losses in single curvilinear channels. Such a study is carried out due to the fact that the interscapular channels of low-consumption turbines with a large flow angle in the impeller have a decisive effect on the efficiency of turbines of this design. Therefore, for the study, channels of rectangular cross-section with a flow rotation angle of 167 at a degree of confusion of 0.5 and 0.7 were selected. When using air as a working medium, the study results showed that the level of kinetic energy losses is lower, the lower the value of the confusion degree and the smaller the curvature radius. And the study of the flow structure showed that an increase in the radius of curvature leads to the closure of secondary vortices and an increase in the length of the friction surface, which is the reason for the increase in energy losses in channels with an increased radius of curvature.

Key words: low-consumption turbines, curvilinear channels, flow separation, boundary layer

Введение

Роль малой энергетики становится все более заметной в условиях рыночной экономики. Причем, энергетические установки небольшой мощности используются не только для нужд малых предприятий, но и в нефтегазовой промышленности, в криогенной технике, на транспорте.

Одним из таких приложений малой энергетики являются малорасходные турбины (МРТ). Актуальность применения МРТ описана достаточно подробно во многих источниках. Однако в данном случае речь идет о турбинах конструкции ЛПИ [1], область применения которых постоянно расширяется. Особенностью конструкции этих МРТ является малый угол выхода потока из соплового аппарата (СА) (3...6°) и большой угол поворота в рабочем колесе (РК) (160...170°). Эти условия позволяют обеспечить турбине высокую степень парциальности при малых расходах рабочего тела.

Существенным недостатком таких турбин являются неоптимальные геометрические параметры рабочих лопаток РК. Поэтому несомненной является актуальность изучения газодинамических процессов, происходящих в проточной части таких МРТ. К настоящему времени существует немало работ, посвященных исследованию и совершенствованию лопаточного аппарата турбин конструкции ЛПИ. При этом, снижение потерь кинетической энергии в рабочем колесе чаще всего базируется на методах

профилирования рабочих лопаток, хорошо зарекомендовавших себя в турбинах традиционных конструкций.

Но как уже отмечалось в [2], турбины конструкции ЛПИ целесообразно отнести к турбинам "канального" типа, у которых определяющим фактором является профиль не лопатки, а межлопаточного канала. И если подходить к вопросам совершенствования указанных МРТ с такой точки зрения, то, прежде всего, следует обратить внимание на изучение структуры потока в сильноизогнутых каналах прямоугольного сечения. Здесь важно выделить факторы, влияющие на потери кинетической энергии в каналах, и подобрать методы воздействия на них.

Исследование структуры потока в конфузных криволинейных каналах

Следует отметить, что исследованию характеристик потока в единичных криволинейных каналах и межлопаточных каналах турбин посвящено немало работ [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Практически всеми исследователями отмечается, что в таких каналах наблюдаются отрывные явления, сопровождающиеся значительными потерями кинетической энергии. А это в свою очередь, приводит к снижению к.п.д. турбины в целом. Поэтому при профилировании криволинейных каналов целесообразно проанализировать факторы, влияющие на структуру потока в канале и выработать рекомендации, соответствующие конкретным условиям проектирования. При этом необходимо

учитывать рекомендации исследователей, глубоко занимавшимися явлениями отрыва [9], [10], а также исследованием влияния различных факторов на структуру потока в каналах [12], [13], [14], [15], [16].

Известно, что отрывные явления в каналах вызываются главным образом, соответствующим сочетанием степени изогнутости канала и скорости потока. Из числа других факторов, влияющих на величину отрыва, можно выделить степень турбулентности пограничного слоя и степень конфузурности самого канала. Под конфузурностью канала будем понимать отношение площадей выходного и входного поперечных сечений: $\bar{a} = F_{\text{вых}} / F_{\text{вх}}$. В этой связи целесообразно учесть результаты исследований Х. Нипперта [11], который обращает внимание на влияние радиуса кривизны поворотного участка канала. Исходя из вышесказанного, оценим влияние указанных факторов на структуру потока и потери кинетической энергии в криволинейных каналах, соответствующих реальным межлопаточным каналам турбин конструкции ЛПИ (рис. 1).

Для экспериментальных исследований были выбраны каналы прямоугольного сечения с неизменной высотой $h = 28$ мм, шириной канала на выходе $a_2 = 8$ мм, углом поворота $\theta = 167^\circ$. Каналы отличаются друг от друга радиусами вогнутой R_2 и выпуклой R_1 стенок, а также степенью конфузурности \bar{a} . Поскольку каналы постоянного сечения исследовались ранее [2], то в данной работе исследовались каналы с конфузурностью $\bar{a} = 0,7$ и $\bar{a} = 0,5$ с радиусами вогнутой стенки $R_2 = 32, 24$ и 16 мм. Указанные параметры соответствуют лопаточному аппарату рабочего колеса реальной МРТ и схема такого лопаточного аппарата представлена на рис. 1.

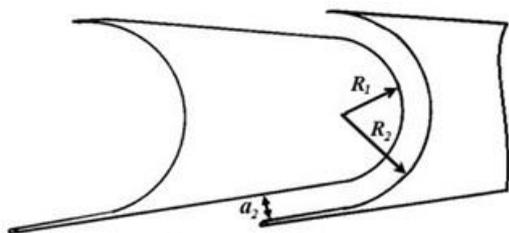


Рис. 1. Схема лопаточного аппарата ПК с большим углом поворота потока

Для измерения статического давления на внутренней и внешней стенках каналы дренировались на уровне средней высоты, а в выходном сечении поток траверсировался трубкой Пито как по высоте, так и по ширине канала. При этом, для контроля состояния потока использовался параметр относительного давления: $\bar{P} = P_{\text{изб}} / P_{\text{атм}}$. Для всех каналов измерение относительного давления и потерь кинетической энергии производилось при значении числа Рейнольдса $Re = 2,3 \cdot 10^5$.

Как отмечено выше, изучение структуры потока в каналах прямо связано с направлением повышения эффективности малорасходных турбин с большим углом поворота потока в РК. Известно, что в настоящее время существуют апробированные компьютерные методы численного исследования газовых потоков в различных элементах турбомашин. В то же время, опыт применения этих методов подтверждает, что надежность выбранных

параметров математической модели, используемой для численного эксперимента, оценивается по адекватности матмодели физическому эксперименту. Именно такой подход позволяет затем проводить численный эксперимент с высоким уровнем достоверности в выбранном диапазоне геометрических и режимных параметров. Поэтому результатам физического эксперимента следует уделять особое внимание с учетом вышеотмеченных позиций.

В данном случае, в процессе проведения экспериментальных исследований определялся уровень потерь кинетической энергии в криволинейных каналах с одновременным изучением структуры потока. Это позволяет оценить влияние вышеотмеченных параметров на уровень потерь в каналах.

В частности, результаты исследования каналов с конфузурностью $\bar{a} = 0,7$ и $\bar{a} = 0,5$ и внешним радиусом $R_2 = 32$ мм представлены на рис. 2.

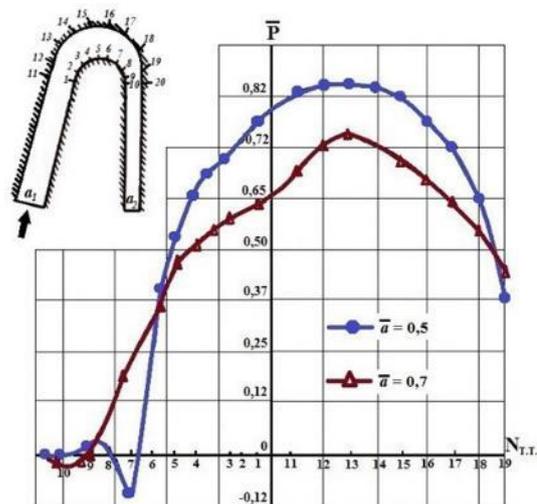


Рис. 2. Изменение относительного давления на стенках каналов при различной конфузурности

Здесь можно заметить, что для канала с $\bar{a} = 0,5$ на выпуклой стенке по направлению движения потока от точки 1 до точки 5 наблюдается устойчивое конфузурное течение. А далее вплоть до точки 7 наблюдается существенное увеличение градиента давления, приводящее к отрицательным значениям относительного давления, после чего давление вновь существенно возрастает. Такое поведение давления, как правило, свидетельствует о наличии отрыва в этой части канала. Что касается вогнутой стенки, то от точки 11 до точки 14 происходит рост давления, что говорит о диффузорном характере течения, а ускорение потока наблюдается в поворотной части канала.

У канала с конфузурностью $\bar{a} = 0,7$ таких резких изменений давления не наблюдается, что говорит об отсутствии отрыва у вершины выпуклой стенки. В то же время, на переходе от криволинейного участка к прямолинейному в районе точки 10 отрицательные значения давления указывают на возможность появления локального отрыва, занимающего часть прямолинейного участка. В этой связи можно отметить, что изменение параметров потока в канале с $\bar{a} = 0,7$ происходит более плавно, чем при $\bar{a} = 0,5$, что вполне соответствует известным

представлениям о влиянии конфузурности на характер течения в каналах.

Однако, исследование структуры потока в каналах с $R_2 = 24$ и 16 мм при том же изменении конфузурности, как и в вышеотмеченном случае, показало, что характер изменения относительного давления вдоль вогнутых и выпуклых стенок в целом соответствует графику изменения давления при $\bar{a} = 0,7$ для канала с $R_2 = 32$ мм. Разумеется, что меняются численные значения, но характер изменения параметров близок к указанному. В частности, для каналов с $R_2 = 24$ и 16 мм при $\bar{a} = 0,5$ не обнаружено локальных зон отрыва на выпуклой стенке как при $R_2 = 32$ мм. Здесь можно предположить, что из-за малого радиуса вогнутой стенки происходит поджатие потока, что мешает образованию отрыва. В то же время в зоне перехода от поворотного участка к прямолинейному наблюдается такое же изменение относительного давления, как и в канале с $R_2 = 32$ мм при $\bar{a} = 0,7$. И так же, как и в этом случае, можно предположить, что отрыв локализуется только в прямолинейной части канала.

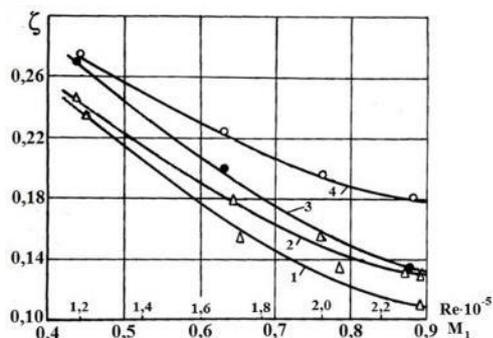


Рис.3. Зависимость изменения потерь кинетической энергии в каналах с различной конфузурностью и различным радиусом кривизны от числа Маха на входе в канал: 1 - $R_2 = 24$ мм при $\bar{a} = 0,5$; 2 - $R_2 = 24$ мм при $\bar{a} = 0,7$; 3 - $R_2 = 32$ мм при $\bar{a} = 0,5$; 4 - $R_2 = 32$ мм при $\bar{a} = 0,7$;

Что касается вогнутых участков описываемых каналов, то уменьшение радиуса кривизны приводит к увеличению протяженности области диффузного течения. И в целом, из анализа структуры потока в каналах с различной конфузурностью можно сделать вывод о том, что картина течения потока соответствует представлениям, описанным в работах [12], [16]. Для более полной оценки влияния конфузурности можно рассмотреть график, представленный на рис.3, зависимости изменения потерь кинетической от числа Маха на входе в канал. Из графика видно, что при сравнении каналов с равными значениями конфузурности в каналах с меньшим радиусом кривизны уровень потерь энергии меньше. Объяснение этому можно найти в работах Х.Нипперта [11], который указывает на критерий относительного радиуса кривизны канала: R_2/a_2 , или R_1/a_2 . Согласно этому критерию каналы с $R_2 = 32$ мм находятся далеко не в оптимальной зоне, поэтому и потери у них больше.

Для того, чтобы проследить влияние радиусов кривизны на структуру потока в канале целесообразно рассмотреть каналы с одинаковой степенью конфузурности, например, при $\bar{a} = 1,0$, по результатам траверсирования потока по высоте на

выходе из канала. Такие результаты представлены на рис. 4.

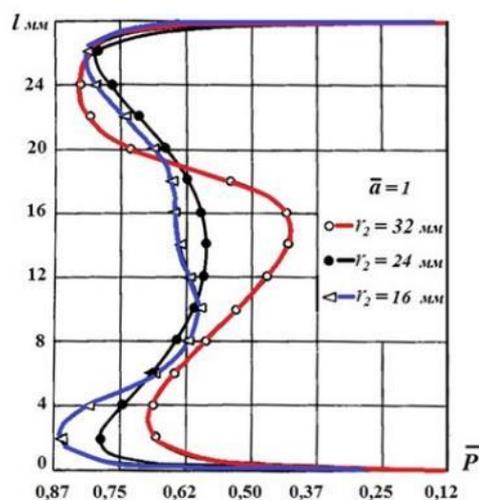


Рис. 4. Влияние радиуса кривизны на распределение относительного давления по высоте канала.

Как видно из графика, наибольшая степень неравномерности распределения давления по высоте наблюдается у канала с $R_2 = 32$ мм, т.е. у канала с наибольшим радиусом кривизны. Это объясняется тем, что у канала с большим радиусом кривизны протяженность участка поворота потока тоже большая, а именно здесь формируются вторичные вихри. Поскольку вихри по ходу потока конусообразно расширяются, то при их большой величине они могут сомкнуться, что и наблюдается у канала с $R_2 = 32$ мм.

На примере именно этого канала можно проследить влияние конфузурности на структуру потока. Как известно, при переходе от канала с равномерным сечением к сужающемуся скорость потока в нем возрастает и при неизменном радиусе кривизны это приводит к росту интенсивности вторичных вихрей.

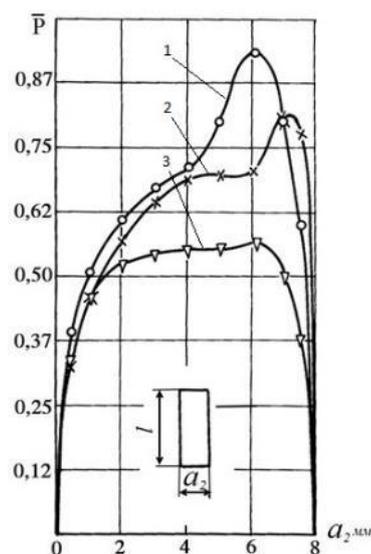


Рис. 5. Изменение относительного давления на выходе из канала с $R_2 = 32$ мм по его ширине при различной конфузурности. 1 - $\bar{a} = 0,5$; 2 - $\bar{a} = 0,7$; 3 - $\bar{a} = 1,0$;

Однако потери энергии в канале при этом снижаются. Такой эффект достигается за счет того, что вторичные вихри локализуют, или даже полностью задавливают области отрыва пограничного слоя. Об этой особенности вторичных течений в коротких каналах уже упоминалось в [3] и [4].

Следует отметить, что в сужающихся криволинейных каналах интенсивность вторичных вихрей настолько высока, что поток не успевает выровняться даже в протяженном прямолинейном участке. При этом, поток при повороте все более отжимается к стенке с внешним радиусом R_2 , и давление у этой стенки возрастает. Такое явление наблюдается и по результатам траверсирования потока по ширине канала на выходе в его средней части. На рис. 5 представлены результаты траверсирования для канала с $R_2 = 32$ мм.

Заключение

По результатам исследования единичных криволинейных каналов можно сделать следующие выводы:

1. В каналах с относительной высотой $\bar{l} = a_2/l = 3,5$ увеличение радиуса кривизны приводит к смыканию вторичных вихрей и возрастанию потерь кинетической энергии;
2. Чем меньше степень конфузурности канала, тем ниже уровень потерь кинетической энергии за счет уменьшения области отрыва пограничного слоя;
3. При развитом отрыве вторичные вихри играют положительную роль в уменьшении суммарных потерь энергии за счет сужения отрывной зоны.

Литература

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение. Труды СПбГПУ. 2004. № 491. С. 152-161.
2. Чехранов С.В. Экспериментальное исследование отрывных течений потока в криволинейных каналах постоянного сечения / С.В. Чехранов, Р.Р. Симашов // Морские интеллектуальные технологии, 2020 №1 том 2, С. 95-99
3. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974. 592 с.
4. Дейч М.Е., Баранов В.А., Фролов В.В. и др. Влияние высоты лопаток на некоторые характеристики одновентечных ступеней турбин. Энергомашиностроение. 1962. №1. С. 6-9.
5. Богомолов Е.Н. О смыкании зон вторичных течений в турбинных решетках и его влияние на концевые потери. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №3. С. 25-31.
6. Богомолов Е.Н. Определение концевых потерь в турбинных решетках с учетом влияния входного пограничного слоя. Изв. ВУЗов. Авиационная техника. 1991. №2. С. 54-60.
7. Гукасова Е.А., Жуковский М.И., Завадовский А.М. и др. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин. Под. ред. В.С. Жуковского и С.С. Кутателадзе. М.: Госэнергоиздат, 1960. 340 с.
8. Дейч М.Е., Лазарев Л.Я., Полникова Т.В. Влияние периодической нестационарности на энергетические характеристики направляющих решеток. Труды МЭИ. 1974. Вып. 203. С. 24-27.
9. Чжен П. Управление отрывом потока. М: Мир, 1979. 552 с.
10. Чжен, Линь Жан-чао, Оу Жен-ву Полностью развитое ламинарное течение в криволинейных каналах прямоугольного поперечного сечения. Труды амер. общ. инженеров-механиков: Теоретические основы инженерных расчетов. 1976. №1. С. 149-156.
11. Nippetr H. Uber den Stromungsverlust in gekrummten Kanalen. Forsch. Auf d. Geb. D. Ing. Wes., 1929, 320 H.
12. Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.
13. Zagzoule M., Cathalifaud P., Cousteix J., Mauss J. Uniformly valid asymptotic flow analysis in curved channels. - Physics of Fluids 24, 013601 (2012)
14. Direct numerical simulation of a turbulent curved pipe flow with a 90° bend Yongmann M. Chung, Zhixin Wang 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), Chicago, USA, July, 2017
15. Kalpakli Vester, A., Orliu, R. & Alfredsson, P. H. 2015 POD analysis of the turbulent flow downstream a mild and sharp bend. Experiments in Fluids 56 (3), 57
16. Kalpakli Vester, A., Orliu, R. & Alfredsson, P. H. 2016 Turbulent flows in curved pipes: recent advances in experiments and simulations. Applied Mechanics Review 68 (5), 050802

References

1. Rassokhin, V.A. Turbiny konstruktzii LPI: Preimushchestva, kharakteristiki, opyt razrabotki i primenenie. [LPI design turbines: Advantages, characteristics, development experience and applications] Trudy SP6GPU. 2004. № 491. С.
2. Chehranov S.V. Jeksperimental'noe issledovanie otrivnykh techenij potoka v krivolinejnykh kanalah postojannogo sechenija / S.V. Chehranov, R.R. Sima-shov // Morskie intellektual'nye tehnologii, 2020 №1 том 2, S. 95-99
3. Deych M.E. Tekhnicheskaya gazodinamika. [Technical gas dynamics] M.: Energija, 1974. 592 s.
4. Deych M.E., Baranov V.A., Frolov V.V. i dr. Vliyanie vysoty lopatok na nekotorye kharakteristiki odnovenechnykh stupeney turbin. [Effect of Blade Height on Certain Characteristics of Single-Shaft Turbine Stages] Energomashinostroenie. 1962. №1. S. 6-9.
5. Bogomolov E.N. O smykaniij zon vtovichnykh techenij v turbinnykh reshetkakh i ego vliyanie na kontsevye poteri. [About closing of secondary current zones in turbine grids and its effect on end losses] Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №3. S. 25-31.
6. Bogomolov E.N. Opredelenie kontsevnykh poter' v turbinnykh reshetkakh s uchetom vliyaniya vkhod-nogo pogranichnogo sloya [Determination of end losses in turbine grids taking into account the influence of the input boundary layer]. Izv. VUZov. Aviatsionnaya tekhnika. 1991. №2. S. 54-60.

7. Gukasova E.A., Zhukovskiy M.I., Zavodovskiy A.M. i dr. Aerodinamicheskoe sovershenstvovanie lopatochnykh apparatov parovykh i gazovykh turbin. [Aerodynamic improvement of steam and gas turbine blades] Pod. red. V.S. Zhukovskogo i S.S. Kutateladze. M.: Gosenergoizdat, 1960. 340 s.
8. Deych M.E., Lazarev L.Ya., Polnikova T.V. Vliyanie periodicheskoy nestatsionarnosti na energeticheskie kharakteristiki napravlyayushchikh reshetok. [Effect of periodic non-stability on energy characteristics of guide grates] Trudy MEI. 1974. Vyp. 203. S. 24-27.
9. Chzhen P. Upravlenie otryvom potoka [Management of a stream separation]. M: Mir, 1979. 552 s.
10. Chzhen, Lin' Zhan-chao, Ou Zhen-vu Polnost'yu razvitoe laminarnoe techenie v krivolineynykh kanalakh pryamougol'nogo poperechnogo secheniya. [Fully developed laminar flow in curved channels of rectangular cross-section] Trudy amer. obshch. inzhenerov-mekhanikov: Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov. 1976. №1. S. 149-156.
11. Nippetr H. Uber den Stromungsverlust in gekrummten Kanalen. Forsch. Auf d. Geb. D. Ing. Wes., 1929,320 H.
12. Daniel Wilde., Analysis of Curvature Effects on Boundary Layer Separation and Turbulence Model Accuracy for Circulation Control Applications "California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2010.
13. Zagzoule M., Cathalifaud P., Cousteix J., Mauss J. Uniformly valid asymptotic flow analysis in curved channels. - Physics of Fluids 24, 013601 (2012)
14. Direct numerical simulation of a turbulent curved pipe flow with a 90° bend Yongmann M. Chung, Zhixin Wang 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), Chicago, USA, July, 2017
15. Kalpakli Vester, A., Orlicu, R. & Alfredsson, P. H. 2015 POD analysis of the turbulent flow downstream a mild and sharp bend. Experiments in Fluids 56 (3), 57
16. Kalpakli Vester, A., Orlicu, R. & Alfredsson, P. H. 2016 Turbulent flows in curved pipes: recent advances in experiments and simulations. Applied Mechanics Review 68 (5), 050802

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Валентинович Чехранов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: turboroom@yandex.ru

Sergei V. Chekhranov, Professor, Dr. Sci. (Eng), Professor of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: turboroom@yandex.ru

Рафаиль Равильевич Симашов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б, e-mail: forsimashov@yandex.ru

Rafail R. Simashov, Ph.D. (Eng), Ass. Prof. of Department of Marine Power Systems, Far Eastern State Technical Fisheries University, Lugovaya, 52B, Vladivostok, 690087, Russian Federation, e-mail: forsimashov@yandex.ru

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 621.3.014.7

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.072

Исследование переходных процессов при однофазных повреждениях изоляции в низковольтных судовых электросетях с учетом сопротивления в месте замыкания

И.Е. Кажекин¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация В работе рассмотрены вопросы безопасности бортовых электросетей объектов морской индустрии, показано влияние перенапряжений на их основные показатели, которыми определяются опасности смертельных электротравм, опасности возникновения пожаров и взрывов. Представлены результаты математического моделирования электрического разряда по уравнению Майра с учетом особенностей переходного процесса при однофазных замыканиях на корпус. Показана роль напряжения смещения нейтрали по постоянному потенциалу, наибольшие значения которого формируются при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна. Описаны результаты экспериментальных исследований переходных процессов, сопровождающихся возникновением неустойчивыми искровыми разрядами. Сравнение результатов расчета по предложенной методике с результатами физических экспериментов показало весьма удовлетворительную сходимость. Предложенная модель может быть использована для уточнения показателей, характеризующих безопасность судовых электросетей.

Ключевые слова: однофазные замыкания, перенапряжения, токи замыкания, судовые электросети, изолированная нейтраль, электрический разряд, безопасность электросетей.

Research of transient processes in case of single-phase insulation faults in low- voltage ship power grids, taking into account the resistance at the fault point

Ilya E. Kazhekin¹¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The paper deals with the safety issues of on-board power grids of the marine industry facilities, shows the influence of overvoltages on their main indicators, which determine the dangers of fatal electrical injuries, the risk of fires and explosions. The results of mathematical modeling of an electric discharge according to the Mayr equation, taking into account the features of the transient process in single-phase short circuits to the case, are presented. The role of the bias voltage of the neutral at a constant potential is shown, the highest values of which are formed during unstable contact of the phase with the ship's hull. The results of experimental studies of transient processes accompanied by the appearance of unstable spark discharges are described. Comparison of the calculation results by the proposed method with the results of physical experiments showed a very satisfactory convergence. The proposed model can be used to refine the indicators characterizing the safety of ship power grids.

Key words: single-phase faults, overvoltages, fault currents, ship power grids, isolated neutral, electrical discharge, power grid safety.

Введение

Известно, что в электросетях с изолированной нейтралью особое внимание уделяется однофазным повреждениям изоляции, которые проявляются в виде замыканий одной из фаз на корпус. На долю однофазных замыканий приходится 75-80% общего числа повреждений в судовых электроустановках [1]. Как правило, при таких замыканиях токи в месте повреждения не требуют отключения и этот режим может существовать достаточно долго. При этом опасность тока оценивается исключительно по величине его установившегося значения, определяемого фазной емкостью, напряжением и частотой электросети.

Однако при неполном замыкании или неустойчивом контакте фазы с корпусом судового электрооборудования возникают переходные процессы. Несмотря на их быстрое затухание, они могут сопровождаться достаточно высокими амплитудами тока. Для оценки их влияния на

показатели, определяющие электро-, пожаро- и взрывоопасность необходимо, прежде всего, провести исследование особенностей переходных процессов при замыканиях фазы на корпус через ненулевое сопротивление, а также рассмотреть особенности сопровождающих их дуговых процессов. Кроме того, на результатах анализа переходных и дуговых процессов при однофазных замыканиях основываются современные принципы выявления опасных неустойчивых замыканий и обнаружение их мест возникновения, разрабатываемых для электросетей средних классов напряжения [2, 3].

1. Переходный процесс при неметаллическом бездуговом замыкании

Анализ переходных процессов выполнен для упрощенной схемы судовой электросети, приведенной на рис. 1.

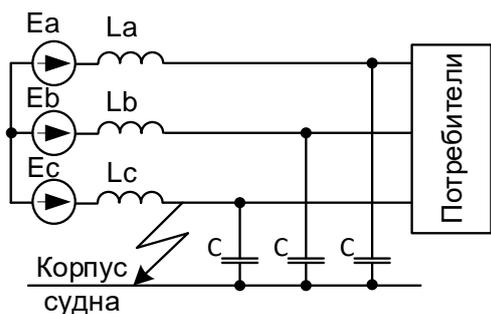


Рис. 1. Схема для анализа переходных процессов

Схема включает обобщенный источник электроэнергии в виде трехфазной системы ЭДС. Продольные параметры электросети и источников представлены в виде индуктивностей L , а изоляция электрооборудования – емкостями C .

При глухом (металлическом) однофазном замыкании, через нулевое сопротивление, представленная схема может быть разделена на две части не оказывающих друг на друга влияния: контур, образованный емкостью поврежденной фазы, и остальная часть электросети [4]. Однако во многих случаях замыкания фазы на корпус происходят через переходное сопротивление, либо сопровождается дугowymi разрядами. При таких замыканиях схему нельзя разделить на независимые части, поскольку процессы протекающих в них будут влиять друг на друга. Анализ процессов в такой схеме может быть проведен на основе метода эквивалентного генератора. Для этого вся электрическая сеть, за исключением ветви замыкания, преобразуется в активный двухполюсник, состоящий из двух ветвей. Ветвь замыкания представляет собой нагрузку полученного двухполюсника. Преобразованная таким образом исходная схема для исследования операторным методом показана на рис. 2.

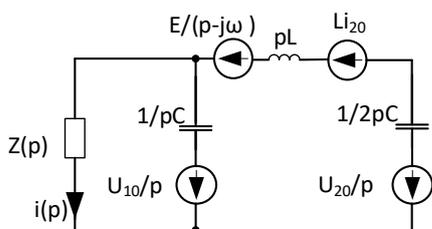


Рис. 2. Схема для анализа переходных процессов

Ток через место повреждения определяется следующим образом:

$$I(p) = \frac{U_{xx}(p)}{Z_{вх}(p) + Z(p)}, \quad (1)$$

где $U_{xx}(p)$ – напряжение холостого хода активного двухполюсника, $Z_{вх}(p)$ – входное сопротивление активного двухполюсника, $Z(p)$ – сопротивление в месте замыкания.

В случае бездугowego замыкания сопротивление в месте повреждения изоляции носит активный характер, т.е. $Z(p) = R$. В этом случае характеристическое уравнение рассматриваемой системы имеет третий порядок, имеющий один отрицательный действительный корень и два комплексных сопряженных с отрицательной вещественной частью. Полученное в результате

проведенных исследований выражение для тока однофазного замыкания имеет следующий вид:

$$i(t) = I_{0m} \sin(\omega t + \varphi_0) + I_{1m} e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_{2m} e^{-\delta_2 t}, \quad (2)$$

где I_{0m}, I_{1m}, I_{2m} – амплитуды принужденной и свободных составляющих, δ_1, δ_2 – постоянные затухания, ω, ω_1 – угловая частота сети и угловая частота собственных колебаний.

Следует отметить наличие в свободном токе апериодической составляющей, амплитуда которой может во много раз превышать установившееся значение тока замыкания. Величины свободных составляющих определяются, прежде всего, начальными условиями переходных процессов, которые могут быть сформированы в предыдущих циклах замыкания. Полученное выражение подтверждается результатами исследования на компьютерной модели в программной среде Multisim, представленной на рис. 3.

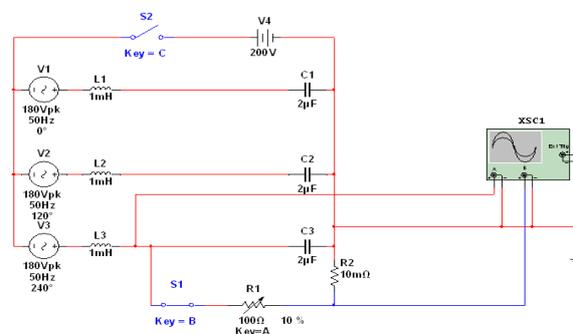


Рис. 3. Компьютерная модель электросети в режиме однофазного замыкания через сопротивление

Для формирования необходимых начальных условий в модели использован источник постоянного напряжения, подключаемый до замыкания к нейтрали. После его отключения, в схеме замыкается ключ S1 через резистор R1. Пример полученных таким образом осциллограмм приведен на рисунке 4.

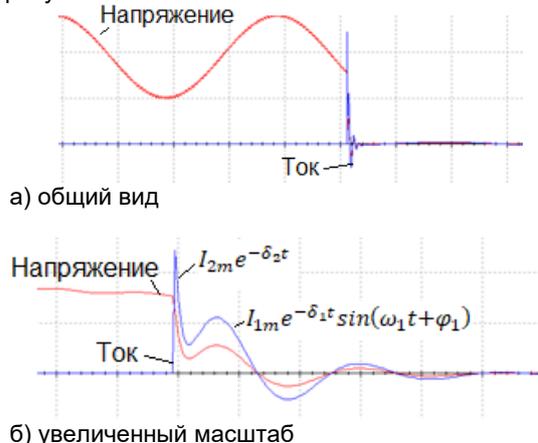


Рис. 4. Зарегистрированные осциллограммы переходных процессов при замыкании через сопротивление

Как видно из рисунка 4, действительно, амплитуды свободных составляющих значительно

превосходят амплитуду тока замыкания в установившемся режиме. При этом смещение нейтрали по постоянному потенциалу, используемое в модели, соответствовало максимальному значению, определенному экспериментальным путем [5].

Такой бездуговой характер замыкания может наблюдаться при прикосновении человека к фазе электросети, подключению участка электросети с ослабленной изоляцией, резком увлажнении или загрязнении изоляции. В большинстве же случаев касание фазы корпуса судна сопровождается возникновением электрических разрядов.

2. Переходный процесс при искровом замыкании

При анализе переходного процесса при замыкании, которое сопровождается электрическим разрядом, необходимо учесть сопротивление искры или дуги в месте касания фазы корпуса. Согласно [6, 7] при малых токах нелинейная характеристика разряда может быть описана на основе уравнения Майра. Тогда выражение для $Z(p)$ приобретет следующий вид:

$$Z(p) = R \frac{\theta p - 1}{\theta p + 1}, \tag{3}$$

где θ - постоянная времени дуги.

Подстановка (3) в (1), позволяет получить характеристическое уравнение четвертой степени, что означает наличие у тока замыкания двух колебательных свободных составляющих. В результате выражение для тока через место замыкания может быть представлено следующим образом:

$$i(t) = I_{0m} \sin(\omega t + \varphi_0) + I_{1m} e^{-\delta_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_{2m} e^{-\delta_2 t} \sin(\omega_2 t + \varphi_1), \tag{4}$$

где ω_2 – вторая частота свободных колебаний.

При этом амплитуда свободной составляющей, определяемой емкостью поврежденной фазы I_{2m} во много раз превышает амплитуды остальных составляющих.

Справедливость полученного выражения подтверждена результатами экспериментов, проведенных на физической модели электросети. Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.

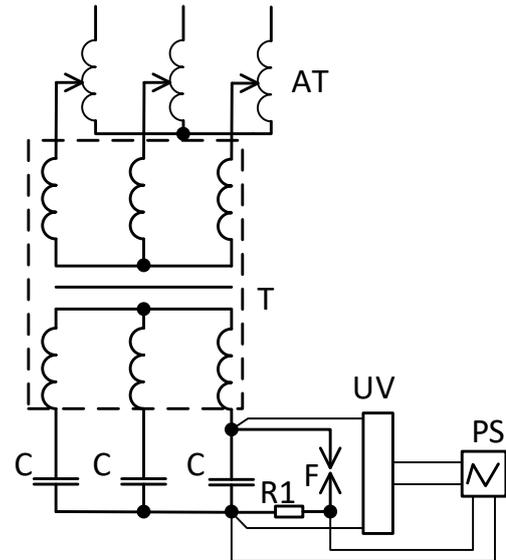
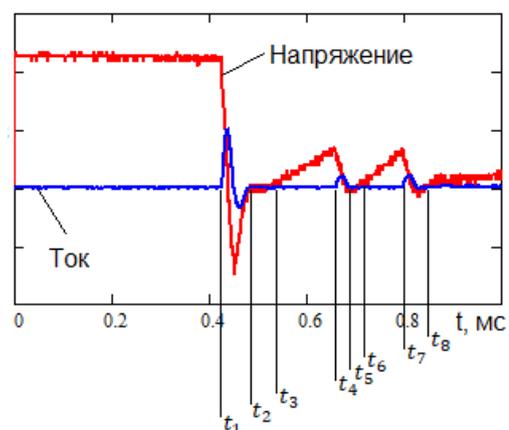


Рис. 5. Схема физической модели электросети в режиме однофазного замыкания через искровой промежуток

Питание осуществлялось через трехфазный автотрансформатор АТ, позволяющий регулировать напряжение модели сети; Т – трансформатор, осуществляющий гальваническую развязку физической модели и питающей электросети. Фазная емкость моделировалась конденсаторами, один из которых шунтирован искровым промежуток F, представляющим собой неустойчивый контакт электродов близких по форме к жилам кабеля и элементам корпуса судна. Измерения проводились при помощи цифрового осциллографа PS. На один канал осциллографа через измерительный шунт R1 подавался сигнал, пропорциональный току через место замыкания, а на другой канал через делитель напряжения UV – напряжению поврежденной фазы.

Пример одной из зарегистрированных таким образом осциллограмм тока замыкания и напряжения приведен на рис. 6.



t_1, t_4, t_7 – моменты замыкания фазы; t_2, t_5, t_8 – моменты завершения искровых процессов; t_3, t_6 – моменты прерывания контакта фазы с корпусом

Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна.

Как видно из рис. 6, при неустойчивом контакте фазы с корпусом судна возникают кратковременные электрические разряды. При этом в ток содержит колебательную составляющую, во много раз превышающую его другие составляющие. На рис. 7 приведен участок этой же осциллограммы в увеличенном масштабе между моментами времени t_1 и t_2 .

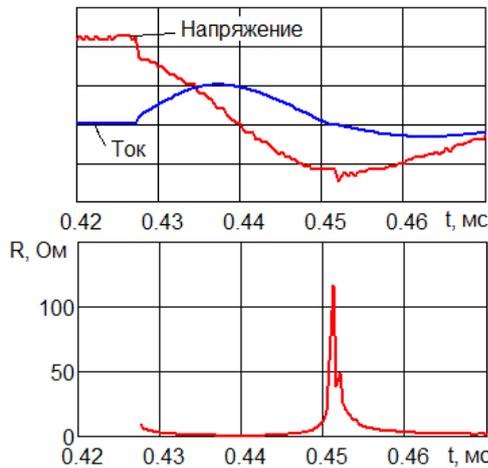


Рис. 7. Изменение напряжения, тока и сопротивления в месте замыкания во время искрового разряда

По мгновенным значениям тока замыкания и напряжения на поврежденной фазе построен также график изменения сопротивления в месте замыкания, показанный на рис. 7. Из этого графика видна нелинейность переходного сопротивления, которую следует учитывать при анализе протекающих при замыкании процессов.

3. Описание электрического разряда при однофазных замыканиях

Особенность описания электрического разряда при однофазных замыканиях заключается в необходимости учета свободных составляющих в токе. При использовании уравнения Майра сопротивление дуги представляется равенством:

$$R = k \cdot e^{-\frac{Q}{Q_0}} \quad (5)$$

где k , Q_0 – постоянные; Q – теплосодержание в единице дуги.

Полагая, что ток задан функцией (4), выражение для градиента канала разряда может быть представлено следующим образом:

$$E = R \cdot i(t) \quad (6)$$

Из уравнения баланса дуги может быть получено следующее выражение [6]:

$$\frac{1}{R} = e^{-t/\theta} \left[\frac{1}{R_0} + \frac{1}{Q_0} \int_0^t i(t)^2 e^{t/\theta} dt \right], \quad (7)$$

где R_0 – сопротивление в начальный момент.

Подставив (4) в (8) и проинтегрировав полученное выражение, можно получить описание изменения проводимости канала разряда. Это описание удобно представить в виде суммы:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=0}^9 G_i. \quad (8)$$

Составляющие выражения (8) определяются следующим образом.

$$G_0 = \frac{1}{R_0} e^{-t/\theta}. \quad (9)$$

Составляющая, обусловленная принужденной составляющей тока замыкания:

$$G_1 = \frac{I_{0m}}{2P_0} \left(1 - \frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{\sqrt{1 + (2\omega\theta)^2}} \right) - \frac{(I_{0m} 2\omega\theta)^2}{2P_0(1 + (2\omega\theta)^2)}. \quad (10)$$

где P_0 – отводимая мощность от единицы длины дуги.

Составляющие, обусловленные свободными колебаниями тока замыкания:

$$G_2 = \frac{I_{1m}}{2P_0} \left(1 - \frac{\cos(2\omega_1 t - \varphi_1)}{\sqrt{1 + (2\omega_1\theta_1)^2}} \right) - \frac{(I_{1m} 2\omega_1\theta_1)^2}{2P_0(1 + (2\omega_1\theta_1)^2)}, \quad (11)$$

$$\text{где } \theta_1 = \theta / (1 - \theta\delta_1).$$

$$G_3 = \frac{I_{2m}}{2P_0} \left(1 - \frac{\cos(2\omega_2 t - \varphi_2)}{\sqrt{1 + (2\omega_2\theta_2)^2}} \right) - \frac{(I_{2m} 2\omega_2\theta_2)^2}{2P_0(1 + (2\omega_2\theta_2)^2)}, \quad (12)$$

$$\text{где } \theta_{20} = \theta / (1 - \theta\delta_2).$$

Составляющие, обусловленные наложением свободных колебаний на установившейся ток замыкания:

$$G_4 = \frac{I_{0m} I_{1m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_1) - 1)^2 + (\omega_{01}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_1 - 1) + e^{-\delta_1 t} (\cos(\omega_{01} t) (1 - \delta_1 \omega_{01}) + \omega_{01}^2 \theta \sin(\omega_{01} t)) \right), \quad (13)$$

$$\text{где } \omega_{01} = (\omega - \omega_1).$$

$$G_5 = \frac{I_{0m} I_{1m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_1) - 1)^2 + (\omega_{10}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_1 - 1) + e^{-\delta_1 t} (\cos(\omega_{10} t) (1 - \delta_1 \omega_{10}) + \omega_{10}^2 \theta \sin(\omega_{10} t)) \right), \quad (14)$$

$$\text{где } \omega_{10} = (\omega + \omega_1).$$

$$G_6 = \frac{I_{0m} I_{2m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_2) - 1)^2 + (\omega_{02}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_2 - 1) + e^{-\delta_2 t} (\cos(\omega_{02} t) (1 - \delta_2 \omega_{02}) + \omega_{02}^2 \theta \sin(\omega_{02} t)) \right), \quad (15)$$

$$\text{где } \omega_{02} = (\omega - \omega_2).$$

$$G_7 = \frac{I_{0m} I_{2m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_2)-1)^2 + (\omega_{20}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_2 - 1) + e^{-\delta_2 t} (\cos(\omega_{20}t)(1 - \delta_2\omega_{20}) + \omega_{20}^2 \theta \sin(\omega_{20}t)) \right), \quad (16)$$

где $\omega_{20} = (\omega_1 + \omega_2)$.

Составляющие, вызванные наложением свободных составляющих друг на друга:

$$G_8 = \frac{I_{1m} I_{2m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_{12})-1)^2 + (\omega_{12}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_{12} - 1) + e^{-\delta_{12} t} (\cos(\omega_{12}t)(1 - \delta_{12}\omega_{12}) + \omega_{12}^2 \theta \sin(\omega_{12}t)) \right), \quad (17)$$

где $\omega_{12} = (\omega_1 - \omega_2)$, $\delta_{12} = \delta_1 + \delta_2$.

$$G_9 = \frac{I_{1m} I_{2m} \theta}{2P_0((\theta(\delta_{12})-1)^2 + (\omega_{21}\theta)^2)} \times \left(e^{-t/\theta} (\theta\delta_{12} - 1) + e^{-\delta_{12} t} (\cos(\omega_{21}t)(1 - \delta_{12}\omega_{21}) + \omega_{21}^2 \theta \sin(\omega_{21}t)) \right), \quad (18)$$

где $\omega_{21} = (\omega_1 + \omega_2)$.

Полученная группа уравнений (9)-(18) может быть использована для описания электрического

разряда в условиях однофазного замыкания в низковольтной электросети. Параметры канала разряда, возникающего в подобных условиях определены в [8].

Заключение

1. Токи однофазных замыканий в электросетях с изолированной нейтралью, независимо от характера повреждения изоляции, могут содержать свободные составляющие, обусловленные разрядом емкости поврежденной фазы. Такие составляющие обладают достаточно большой амплитудой. В случае бездугового замыкания они имеют аperiodический характер, а при замыкании, сопровождающемся электрическим разрядом – колебательный.

2. Амплитуды этих составляющих во многом определяются начальными условиями, которые формируются перед замыканием. Основным фактором, влияющим на их величину, является напряжение смещения нейтрали по постоянному потенциалу, возникающее после предшествующих циклов замыканий и размыканий фазы электросети и корпуса. Поэтому переходные процессы в электрических системах с изолированной нейтралью следует рассматривать с учетом формирующихся в них перенапряжений.

3. На основе проведенных исследований предложено описание дуговых процессов при однофазных замыканиях. Несмотря на то, что при его использовании значительно усложняется анализ переходных процессов, появляется возможность учесть все свободные составляющие тока замыкания.

Литература

1. Никифоровский Н.Н., Брунав Я.П., Татьяначенко Ю.Г., Электропожаробезопасность судовых электрических систем. Л.: Судостроение. 1978. 120 с.
2. Liu B., Tang J., Wu X., Wang J. and Yang C., Analysis of Arc Model and its Application in Single-phase Grounding Fault Simulation in Distribution Networks, 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1865-1871.
3. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением. Электричество. 2005. № 6. С. 9-18.
4. Цапенко Е.Ф., Замыкания на землю в сетях 6 - 35 кВ. Москва, Энергоатомиздат, 1986 г. , 128 с.
5. Благинин В. А., Лозовенко В.И., Кажехин И.Е., Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали. Известия КГТУ. 2008. № 13. С. 118-121.
6. Залесский А.М., Электрическая дуга отключения М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. 267 с.
7. Ковалев А.П., Бершадский И.А., Иохельсон З.М., Моделирование параметров разряда и расчетная оценка искробезопасности при размыкании электрической цепи. Электричество. 2009. №11. С. 62-69.
8. Кажехин И.Е., Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-4 (46). С. 83-87.

References

1. Elektropozharobezопасnost' sudovykh elektricheskikh system [Electrical fire safety of ship electrical systems]. N.N. Nikiforovskiy, Ya.P. Brunav, Yu.G. Tat'yanchenko. L.: Sudostroenie. 1978. 120 s.
2. Liu B., Tang J., Wu X., Wang J. and Yang C., Analysis of Arc Model and its Application in Single-phase Grounding Fault Simulation in Distribution Networks, 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 1865-1871.
3. Kachesov V.E. Metod opredeleniya zony odnofaznogo zamykaniya v raspredelitel'nykh setyakh pod rabochim napryazheniem [Method for determining the zone of a single-phase fault in distribution networks under operating voltage.]. Elektrichestvo. 2005. № 6. S. 9-18.
4. Tsapenko E.F. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6 - 35 kV [Earth faults in networks 6 - 35 kV]. Moskva, Energoatomizdat, 1986 g. , 128 s.

5. Blagin V. A., Lozovenko V.I., Kazhekin I.E. Dugovye perenapryazheniya v sudovykh elektrosistemakh s razlichnymi rezhimami neytrali [Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали]. Izvestiya KGTU. 2008. № 13. S. 118-121.
6. Zaleskiy A.M. Elektricheskaya duga otklyucheniya [Electric arc tripping]. M.: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1963. 267 s.
7. Kovalev A.P. Bershadskiy I.A., Iokhel'son Z.M. Modelirovanie parametrov razryada i raschetnaya otsenka iskrobezopasnosti pri razmykanii elektricheskoy tsepi [Modeling of discharge parameters and computational assessment of intrinsic safety when opening an electrical circuit]. Elektrichestvo. 2009. №11. S. 62-69.
8. Kazhekin I.E. Opisaniye protsessov pri dugovykh odnofaznykh zamykaniyakh v nizkovol'tnykh sudovykh elektrosetyakh s kompensirovannoy neytral'yu Description of processes in single-phase arc faults in low-voltage ship power networks with compensated neutral. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-4 (46). S. 83-87.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Евгеньевич Кажекин, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

Ilya E. Kazhekin, Ph.D. (Eng)., assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: kazhekin@mail.ru

УДК 629.5

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.073

Рекомендации по обеспечению качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах

В.Ф. Белей¹, М.С. Харитонов¹, Р.О. Брижак¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В настоящее время на судах и объектах морской индустрии широко внедряется энергосберегающее электрооборудование, что позволяет добиться резкого снижения расхода электроэнергии и массогабаритных показателей оборудования, существенно расширяет функциональные возможности электротехнических комплексов и систем, приводит к улучшению эксплуатационных характеристик. Однако использование новейших энергосберегающих технологий, основанных на нелинейных элементах, и коммутация электрооборудования приводит к ухудшению качества электрической энергии в судовой электроэнергетической системе. В то же время, растет число потребителей, предъявляющих к качеству электроэнергии повышенные требования. В итоге, работа судовых энергокомплексов может отличаться от расчетной, а в ряде случаев становится аварийной. В работе приведены результаты экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии в судовой электроэнергетической системе учебного парусного судна «Крузенштерн». Представлены результаты лабораторных исследований на физической модели судовой электростанции с источниками электромагнитных помех, обоснованы организационные и технические решения по снижению уровня электромагнитных помех в судовых электроэнергетических системах.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, дизель-генератор, асинхронный электродвигатель, качество электроэнергии, ток, высшие гармоники.

Power quality improvement recommendations for shipboard power systems

Valeriy F. Beley¹, Maxim S. Kharitonov¹, Roman O. Brizhak¹¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. Nowadays, energy-saving electrical equipment is widely introduced on ships and maritime industry facilities. It leads to a decrease in power consumption, weight and dimensions of equipment, significantly expands the functionality of electrical complexes and systems, and provides improvement of operational characteristics. However, the use of the latest energy-saving technologies based on non-linear elements and the switching of electrical equipment leads to a deterioration in the quality of electrical energy in the ship's electric power system. At the same time, the number of consumers with increased requirements for the quality of electricity is growing. As a result, the operation of ship power complexes may differ from the normal one, and in some cases it becomes emergency. The paper presents the results of experimental studies of electric power quality indicators in the ship's electric power system of the sail training ship "Kruzenshtern". The results of laboratory studies on a physical model of a ship power plant with sources of electromagnetic interference are presented, organizational and technical solutions to reduce the level of electromagnetic interference in ship power systems are substantiated.

Key words: shipboard power system, diesel generator, asynchronous electric motor, power quality, current, higher harmonics.

Введение

Широкое использование на судах силовой полупроводниковой техники, различных электроприводов, осветительных приборов на базе газоразрядных и светодиодных ламп приводит к снижению расхода электроэнергии на стадии ее потребления и массогабаритных показателей оборудования, меняет и расширяет функциональные возможности судовых электротехнических комплексов и систем. Однако, их использование приводит к ухудшению качества электрической энергии в судовой электрической сети. В первую очередь к искажению синусоидальности кривой напряжения и тока и, как следствие, к эмиссии высших гармонических, коммутационным перенапряжениям. В то же время, растет число потребителей, предъявляющих к качеству электроэнергии повышенные требования. В итоге, вышеизложенный ряд взаимосвязанных проблем может привести к тому, что работа судовых энергокомплексов может отличаться от расчетной, а в ряде случаев становится аварийной. Проведение экспериментальных исследований качества

электроэнергии в судовых энергосистемах, и его анализ создает основу для решения этой проблемы.

1. Объект исследования - электроэнергетическая система барка Крузенштерн

Дата постройки барка 1926 год, верфь Текленборга. Основное назначение судна: практика курсантов, экспедиции с исследовательскими целями, в том числе трансатлантические и кругосветные (рис.1).

За годы эксплуатации компоновка судна неоднократно подвергалась реконструкции, в том числе и судовая электроэнергетическая система (СЭЭС). Первоначально система электроснабжения была выполнена на постоянном токе. Далее применялись инверторы для питания судового оборудования переменного тока. Затем СЭЭС была переоборудована на переменный ток: с заменой генерирующих установок постоянного тока на дизель-генераторы (ДГ) (табл. 1, рис. 2).

Количество генерирующих установок судна в настоящий момент является избыточным, так как суммарная потребляемая мощность при максимально нагруженном режиме эксплуатации силового оборудования не превышает 190 кВт.



Рис. 1. Российское учебное парусное судно «Крузенштерн»

Из-за особенностей выхлопного тракта выходная мощность каждого ДГ ограничена до 135 кВт. Реконструкции также подверглась система аварийного питания с полной заменой как генерирующего оборудования (на генератор переменного тока), так и цепей распределения электрической энергии, включая защитную автоматику. В настоящее время работы по замене судового электротехнического оборудования продолжаются. Анализ судовой документации показал, что в сети напряжением 400 В эксплуатируется преимущественно устаревшее силовое оборудование, значительную часть которого составляют асинхронные электродвигатели. На судне используются преимущественно люминесцентные источники освещения.

Таблица 1

Состав генерирующего оборудования УПС «Крузенштерн»

Тип	Марка	Количество	U _{ном} , В	P, кВт	I _{макс} , А	Частота вращения, об/мин
Основной ДГ	178968/2 D.Ebearing6316	2	400	172	310	1500
	116394/4 LSAM 46.2L6	2	390	150	271	1500
Аварийный ДГ	Туре БГ 100КЗ-40М4 181А	1	400	150	181	1500

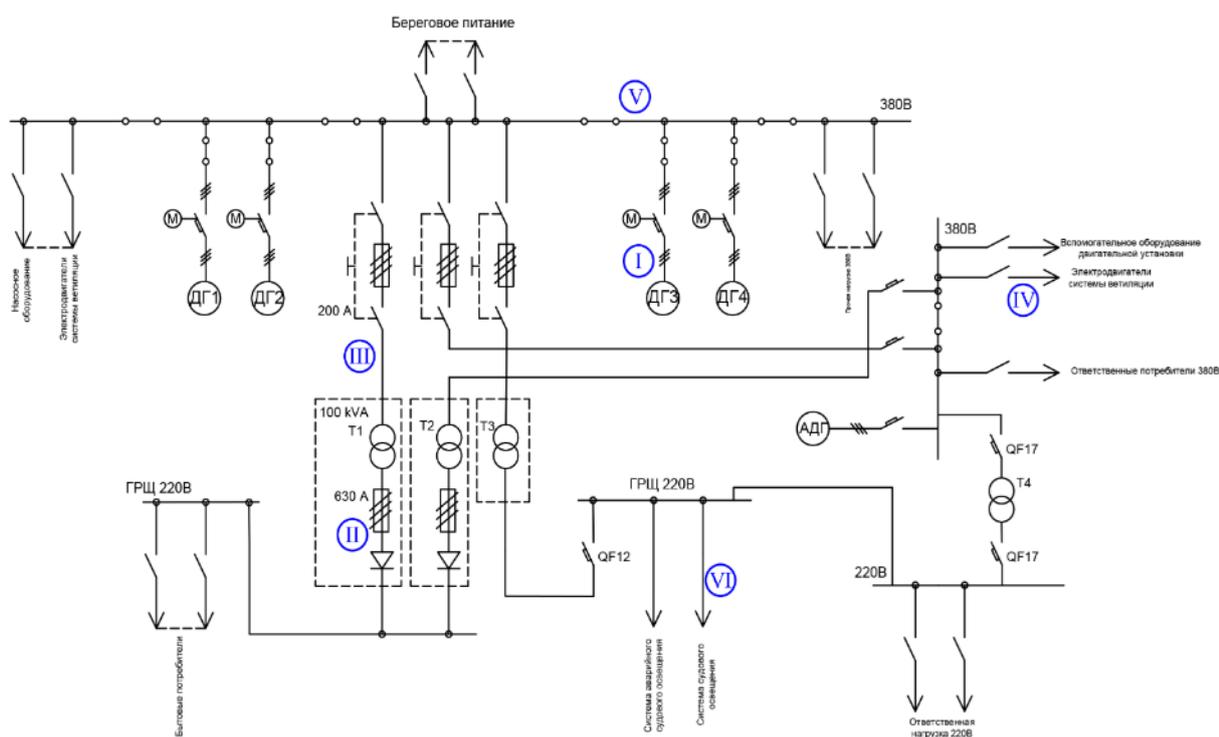


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема электроэнергетической системы УПС «Крузенштерн»

2. Приборы и методика проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований применялись анализатор качества электрической энергии Fluke-434, осциллограф Owon SDS6062. Измерение токов осуществляется с использованием измерительных трансформаторов Fluke i400s и i5s. С учетом величины напряжения

400 В в СЭЭС реализовалось прямое подключение измерительного комплекта в сеть (рис. 3).

Технические характеристики Fluke-434 и специализированных измерительных клещей обеспечивают достаточную с инженерной точки зрения точность измерений в широком диапазоне значений напряжений и токов (табл. 2).

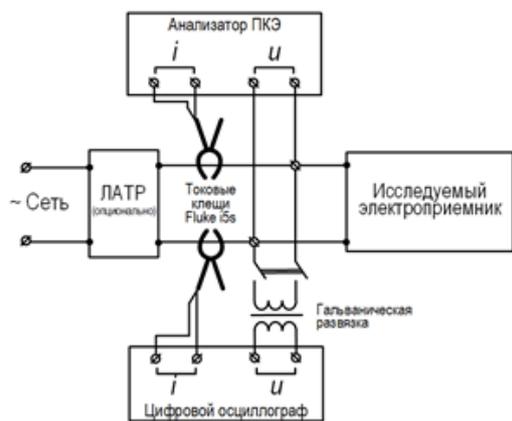


Рис. 3. Схема подключения измерительного оборудования для исследования качества электроэнергии

Таблица 2

Погрешность измерений прибора Fluke-434

Параметр	Погрешность
Величина напряжения	±0,5%
Величина тока (прибор)	±1,0% ±5 ед. счета
Величина тока (клещи i400s)	±2,0% ±0,015 А
Величина тока (клещи i5s)	±1,0% ±5 мА
Мощность	±1,5% ±10 ед. счета
Коэффициент мощности	±0,03
Коэффициенты гармонических составляющих 2-40 порядка	±5,0% ±2 ед. счета
Суммарные коэффициенты гармонических составляющих	±2,5%

3. Результаты исследований показателей качества электроэнергии в СЭЭС

В период исследований СЭЭС функционировала автономно от одного ДГЗ (табл. 3). Измерения производились в заранее определенных характерных точках вблизи источников

электроэнергии, вблизи источников электромагнитных помех и на путях распределения электроэнергии. Точки измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) отмечены на рис. 2 цифрами I-VI.

Результаты исследований в цепи дизель-генератора ДГЗ (точка I) представлены в табл. 4. Показатели несинусоидальности тока и напряжения включают коэффициенты высших гармонических составляющих (1) и суммарный коэффициент высших гармонических составляющих (2).

Анализ данных табл. 4 показывает, что значения ПКЭ в цепи генератора ДРЗ не превышают нормы, установленные Российским морским Регистром судоходства (табл. 5). В частности, максимальное отклонение частоты составило 0,66%, отклонение напряжения δU не превысило 0,33%.

Таблица 3

Перечень работающего оборудования на момент проведения исследований

Группа потребителей	P, кВт
Система судового освещения	3,2
Система вентиляции и кондиционирования	12,6
Вспомогательное электрооборудование генератора ДГ-1	15,2
Бытовая сеть 220В	3,6
Осушительный насос (периодически)	11,2
Общая мощность:	45,8

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$K_{U(n)} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

где $U_{(n)}$ – значение амплитуды n-ой гармоники напряжения; $U_{(1)}$ – значение амплитуды 1-ой гармоники напряжения.

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в цепи генератора ДГ-3

Показатель	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P_{\Sigma}, кВт$	$S_{\Sigma}, кВА$	$Q_{\Sigma}, квар$
Значение	380,9	380,6	381,2	101,6	103,2	101,6	58,2	67,45	34,04
Несинусоидальность	$K_{\Sigma}, \% (THD)$	коэффициенты высших гармонических составляющих, %							
		K_3	K_5	K_7	K_9	K_{11}	K_{13}	K_{15}	
напряжение	U_{AB}	2,9	0,2	2,0	2,0	0,3	0,3	0,2	0,1
	U_{BC}	2,8	0,3	1,8	1,9	0,2	0,3	0,4	0,1
	U_{CA}	2,8	0,2	1,7	2,1	0,2	0,3	0,3	0,1
ток	I_A	6,5	5,0	3,0	2,4	0,7	0,98	0,9	0,2
	I_B	6,3	5,1	2,7	1,8	1,4	1,2	0,5	0,1
	I_C	5,8	4,77	2,3	1,8	0,7	1,1	0,9	0,1

Несмотря на то, что высшие гармоники тока нормативными документами Регистра [1] не регламентируются, они оказывают влияние на гармонический состав напряжения. В каждой точке сети напряжение будет определяться напряжением, подводимым от питающей сети ($U_{сети}$), и суммой падений напряжения от всего спектра высших гармонических составляющих тока, эмитируемых нелинейными электроприемниками в судовую электрическую сеть (3).

$$U = U_{сети} + \sum_{n=2}^{15} i_n \cdot Z_n \quad (3)$$

где Z_n – гармоническое сопротивление участка цепи на частоте f_n .

Таблица 5

Требования к качеству электроэнергии в судовых электроэнергетических системах

Показатель	Допустимое значение
Отклонение частоты - длительное: - кратковременное (5 с):	±5 % ±10 %
Отклонение напряжения - длительное: - кратковременное (1,5 с):	+6 / -10 % ±20 %
Коэффициент несинусоидальности кривой напряжения	10 %
Коэффициенты гармонических составляющих напряжения 2-15 порядка	10 %

Нелинейные однофазные электроприемники и система освещения судна получают электропитание через понижающий трансформатор. Наличие магнитной связи и способ соединения обмоток оказывают влияние на распространение электромагнитных помех. Оценка влияния трансформатора возможна на основе данных о показателях качества электроэнергии на стороне повышенного и пониженного напряжения (табл. 6).

Таблица 6

Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в цепи трансформатора

Точка	$\delta U, \%$	напряжение			ток		
		$K_{\Sigma}, \%$	$K_5, \%$	$K_7, \%$	$K_{\Sigma}, \%$	$K_5, \%$	$K_7, \%$
II	0,86	3,2	2,3	2,6	17,5	9,6	11,6
III	0,32	3,1	2,3	2,1	19,2	12,5	11,9

В цепи трансформатора преобладают пятая и седьмая высшие гармонические составляющие тока (рис. 4), что, как правило, свидетельствует о наличии среди нелинейных нагрузок выпрямителя по шестифазной схеме.

В общей совокупности искажающих нагрузок на судне имеется большое число асинхронных электродвигателей, ряд из которых характеризуются большим числом коммутаций, что, как следует из приведенных диаграмм (рис. 5), приводит к электромагнитным помехам в СЭЭС.

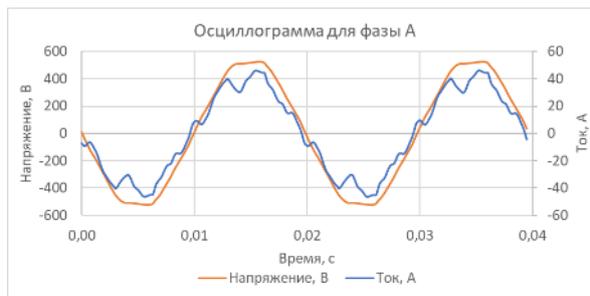


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока в цепи трансформатора со стороны высокого напряжения

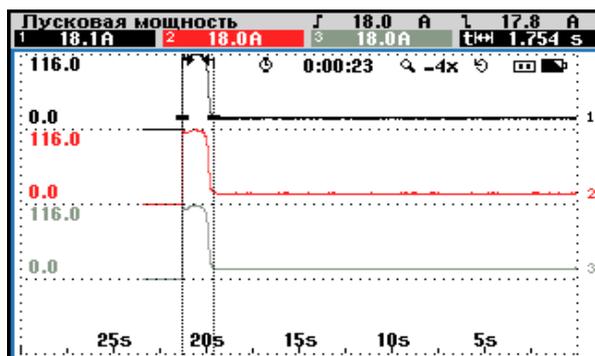


Рис. 5. Диаграмма токов при пуске электродвигателя ($P_{ном} = 6,5$ кВт) электропривода системы вентиляции

4 Оценка эффективности решений по снижению электромагнитных помех

Основными источниками электромагнитных помех (ЭМП) на объектах морской индустрии являются нелинейные электроприемники. Наиболее эффективное решение возможно на стадии проектирования путем разработки и внедрения электрооборудования с очень низким уровнем ЭМП, обеспечивающим электромагнитную совместимость с другим электрооборудованием, эксплуатируемом в СЭЭС. При использовании нелинейных электроприемников с высоким уровнем ЭМП, следует применять схемные решения. Основными электроприемниками на объектах морской индустрии, в частности на морских судах, являются асинхронные электродвигатели, при коммутации которых с сетью возникают также ЭМП.

4.1. Рекомендации по использованию в СЭЭС светодиодных светильников

Светодиодные (СД) световые приборы превосходят лампы накаливания и люминесцентные лампы по светоотдаче, сроку службы, механической прочности и не содержат вредных веществ [2], что способствует их повсеместному внедрению в системах освещения.

В то же время внедрение СД световых приборов без предварительной оценки электромагнитной совместимости в ряде случаев приводит к нарушению работоспособности приборов и электрооборудования, подключенного к той же электрической сети. Основные трудности при этом обусловлены отсутствием в технической документации СД продукции подробных данных о энергетических характеристиках и уровнях эмитируемых ЭМП. Проведенные исследования

ряда СД ламп [2] выявили существенные различия их энергетических характеристик (рис. 6).

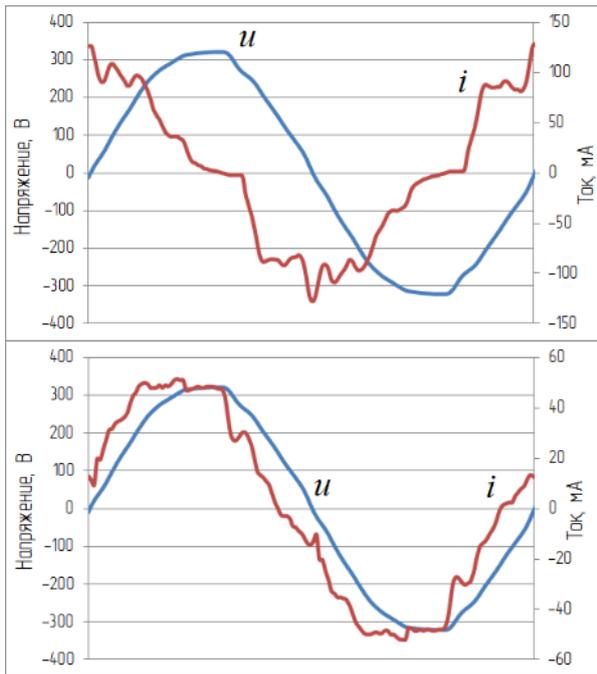


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока, потребляемого СД лампами из сети

Анализ данных рис. 6 показывает, что первый образец характеризуется высокими уровнями ЭМП ($K_{ЭП}=20,9\%$, $\cos\phi=0,14$), в то время как второй образец имеет низкий уровень эмиссии высших гармоник тока и малое потребление реактивной мощности ($K_{ЭП}=9,6\%$, $\cos\phi=0,93$). Однако на практике для получения подобных энергетических характеристик требуется предварительное исследование световых приборов [2], позволяющее в дальнейшем обосновать выбор изделий с наименьшим уровнем ЭМП.

4.2. Рекомендации по снижению ЭМП со стороны полупроводниковых преобразователей

На объектах морской индустрии широкое распространение получили частотно-регулируемые электроприводы (рис. 7), имеющие в своём составе выпрямитель (В), фильтр (Ф) и автономный инвертор напряжения (АИН). При работе электропривода шестифазный выпрямитель эмиссирует в питающую сеть высшие гармоники тока (табл. 7).

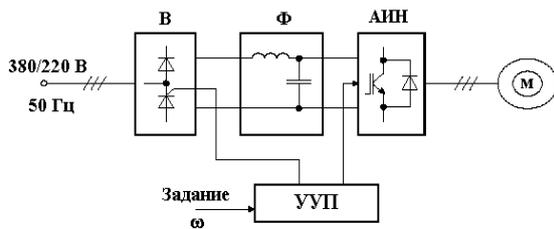


Рис. 7. Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода

Таблица 7

Состав гармоник тока эмиссируемых выпрямителями при различной фазности

Фаза	Состав гармоник тока								
6	5	7	11	13	17	19	23	25	29
12	-	-	11	13	-	-	23	25	-
24	-	-	-	-	-	-	23	25	-

Исследования помех, эмиссируемых выпрямителем были проведены на лабораторной модели судовой электростанции (рис. 8, 9, табл. 8).

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что исследуемый выпрямитель эмиссирует в сеть преимущественно пятую и седьмую высшие гармоники тока. Для снижения ЭМП возможно применить схемные решения:

- повышение фазности полупроводниковых преобразователей до 12 или до 24 резко снижает уровни ВГ тока;
- подключение нелинейной выпрямительной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания;
- применение фильтров, в частности, применение на судне «Куршская коса» (рис. 10) силового фильтра пятой гармоники повысило $\cos\phi$ ВГ с 0,85 до 0,93, в 10 раз снизило импульсные перенапряжения, возникающие в сети при работе полупроводникового преобразователя, приблизило форму тока, потребляемого электроприводом из сети к синусоидальной [3, 4].

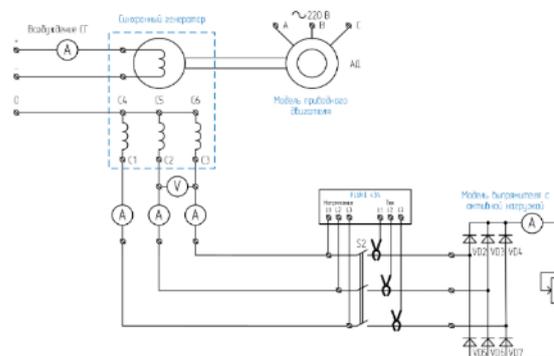


Рис. 8. Лабораторная модель судовой электростанции

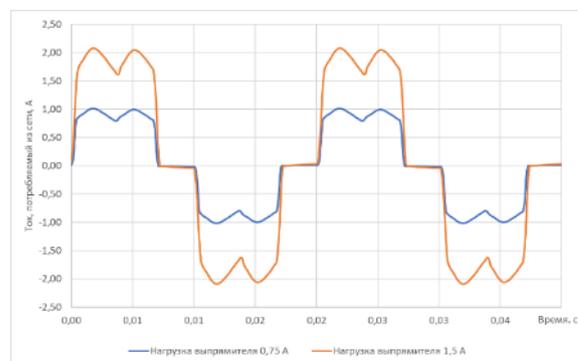


Рис. 9. Осциллограмма входного тока выпрямителя в зависимости от нагрузки

Таблица 8

Параметры электроэнергии на входе выпрямителя

Нагрузка (пост. ток)	Параметр	Значение	K _Σ , % (THD)	Коэффициенты высших гармонических составляющих, %						
				K ₃	K ₅	K ₇	K ₉	K ₁₁	K ₁₃	K ₁₅
0,75 А	напряжение	220 В	4,6	1,0	3,8	0,9	0,1	1,7	0,3	0,1
	ток	0,74 А	28,8	1,0	24,2	8,6	0,5	7,8	5,98	0,5
1,5 А	напряжение	220 В	5,0	1,0	3,2	1,6	0,1	2,6	0,4	0,1
	ток	1,52 А	28,0	1,0	24,2	8,4	0,6	7,6	5,2	0,5

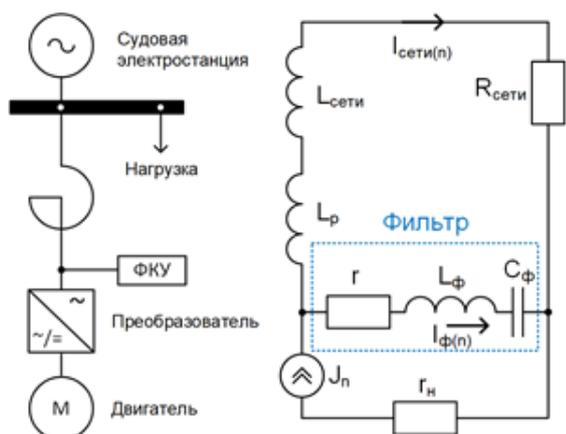


Рис. 10. Схема подключения фильтра электропривода тросовой лебедки судна «Куршская коса» и схема замещения для высших гармоник тока

4.3. Рекомендации по снижению ЭМП при коммутации асинхронных электродвигателей

Асинхронные электродвигатели сравнительно большой мощности в процессе пуска потребляют значительные по величине токи, что приводит к снижению величины напряжения в судовой сети. На рис. 11 представлена осциллограмма тока и напряжения в процессе пуска асинхронного двигателя номинальной мощностью 3 кВт, полученная на лабораторной модели судовой ЭЭС. Значительное снижение напряжение обусловлено соизмеримой мощности электродвигателя и синхронного генератора.

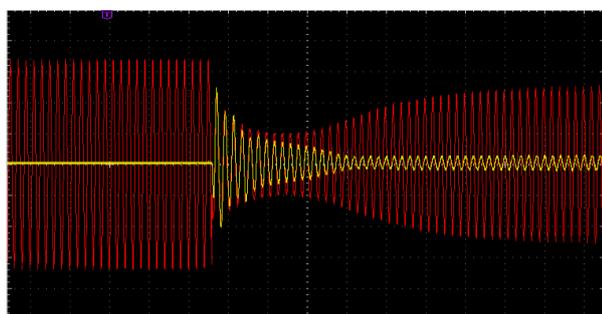


Рис. 11. Осциллограмма тока (желтый) и напряжения в судовой сети (красный) при пуске электродвигателя

Одним из эффективных способов снижения ЭМП при коммутациях асинхронного двигателя и

повышения его cosφ в эксплуатационных режимах является использование конденсаторной батареи. Подключение компенсирующего устройства к зажимам двигателя уменьшает величину тока, потребляемого электродвигателем при той же активной мощности на валу [5]. При этом защита и система контроля работы электропривода должны быть отрегулированы на новое номинальное значение потребляемого тока (рис. 12).

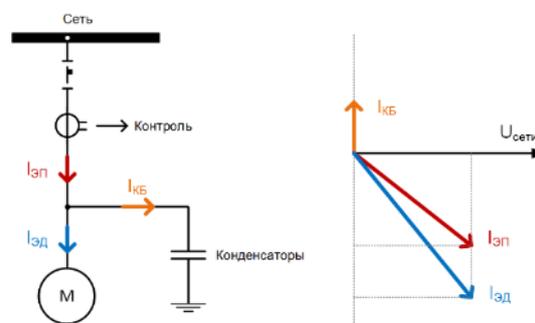


Рис. 12. Схема и векторная диаграмма асинхронного двигателя с системой индивидуальной компенсации

При окончательном выборе мощности конденсаторов, присоединяемых к зажимам асинхронного двигателя, следует иметь в виду, что при мощности конденсаторов, превышающей 50% полной номинальной мощности двигателя, могут возникнуть перенапряжения и колебания момента на валу двигателя при его коммутации с присоединенным конденсатором. В таком случае следует провести проверку на обеспечение электромагнитной устойчивости рассматриваемой системы.

Заключение

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы. Результаты экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии в судовой электроэнергетической системе учебного парусного судна «Крузенштерн» не выявили отклонения от нормативных требований. На лабораторных моделях осуществлено моделирование судовой электроэнергетической системы с учетом источников электромагнитных помех, что позволило оценить их уровень и наметить пути по их снижению.

Литература

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. –2019.
2. Белей В.Ф. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах освещения на основе светодиодных ламп/ В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // М.- Новое в российской электроэнергетике. -2018, №11.- С.15-21.
3. Белей В.Ф. Научное обоснование методов повышения эффективности электротехнических комплексов и систем // Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. - МАМИ. - 2004. -48с.
4. Белей В.Ф. Баланс реактивной мощности судовых энергосистем: проблемы и некоторые пути их решения / Международный Балтийский морской форум. Т.2. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018. - С. 123-128.
5. Белей В.Ф., Харитонов М.С., Брижак Р.О. Уточненная методика расчета баланса реактивной мощности судовой электростанции/ Морские интеллектуальные технологии, 2018, №4 (42), Т3, С67-71.

References

1. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov [Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships] , 2019.
2. Beley V.F. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti v sistemakh osveshcheniya na osnove svetodiodnykh lamp [Ensuring electromagnetic compatibility in lighting systems based on LED lamps]. V.F. Beley, M.S. Kharitonov. Novoe v rossiyskoy elektroenergetike. 2018, №11.S.15-21.
3. Beley V.F. Nauchnoe obosnovanie metodov povysheniya effektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem [Scientific substantiation of methods for increasing the efficiency of electrical complexes and systems]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni d.t.n., 2004. 48s.
4. Beley V.F. Balans reaktivnoy moshchnosti sudovykh energosistem: problemy i nekotorye puti ikh resheniya [Reactive power balance of ship power systems: problems and some ways to solve them]. Mezhdunarodnyy Baltiyskiy morskoy forum. Kaliningrad, 2018. S.123-128.
5. Beley V.F., Kharitonov M.S., Brizhak R.O. Utochnennaya metodika rascheta balansa reaktivnoy moshchnosti sudovoy elektrostantsii [Refined methodology for calculating the reactive power balance of a ship power plant]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2018, №4 (42), S67-71

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Валерий Феодосиевич Белей, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект 1, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Valeriy F. Beley, Dr.Sci. (Eng), professor, head of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: vbeley@klgtu.ru

Максим Сергеевич Харитонов, кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект 1, e-mail: maksim.haritonov@klgtu.ru

Maxim S. Kharitonov, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Electrical Power Engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: maksim.haritonov@klgtu.ru

Роман Олегович Брижак, аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект 1, e-mail: brizhak12@gmail.com

Roman O. Brizhak, graduate student of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: brizhak12@gmail.com

ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.12.001.2

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.074

Концепция управления безэкипажными судами

В.А. Бондарев¹, В.А. Волкогон¹, Ю.И. Нечаев¹, И.Р. Рагулина¹

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В работе рассматривается теоретический базис реализации поведения морских безэкипажных судов в нестационарной среде на основе современной теории катастроф (СТК), интегрирующей интеллектуальные технологии и высокопроизводительные вычисления в рамках мультифункционального программного комплекса (МПК). Стратегия управления транспортным потоком (ТП) определяет построение и интерпретацию поведения безэкипажных судов на основе центра дистанционного управления (ЦДУ). Интеллектуальная поддержка (ИП) процедур безэкипажного управления в ЦДУ обеспечивается с помощью многофункционального программного комплекса. Практическое приложение разработанной технологии безэкипажного управления ориентировано на использование гибридного моделирования, больших объемов данных (Big Data) в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC). Представлен новый подход интерпретации процессов и явлений, характеризующих эволюционную динамику безэкипажных морских судов в отличие от парадигмы безэкипажного управления, используемой в зарубежных странах. Рассмотрены примеры моделирования эволюционной динамики безэкипажных судов в различных условиях эксплуатации: при прохождении судна ледового поля со сложными образованиями; движение судна на ограниченном фарватере; виртуальное моделирование безэкипажного судна под воздействием морского волнения с частотным спектром.

Ключевые слова: безэкипажные суда, искусственный интеллект, современная теория катастроф, интеллектуальная поддержка, центр дистанционного управления.

Unmanned vessel management concept

Vitaly A. Bondarev¹, Vladimir A. Volkogon¹, Yuri I. Nechaev¹, Izumrud R. Ragulina¹

¹ Kaliningrad State Technical University

Abstract. The paper considers the theoretical basis for the implementation of the behavior of seagoing unmanned vessels in a non-stationary environment based on the modern theory of catastrophes, which integrates intellectual technologies and high-performance computing within the framework of a multifunctional program complex]. The traffic control strategy determines the construction and interpretation of the behavior of unmanned vessels based on the remote control center (RCC). Intelligent support of crewless control procedures in the RCC is provided using a multifunctional program complex (MPC). The practical application of the developed technology of unmanned control is focused on the use of hybrid modeling, large amounts of data (Big Data) in the emergency computing mode (Urgent Computing - UC). A new approach to interpreting the processes and phenomena that characterize the evolutionary dynamics of unmanned sea vessels, in contrast to the unmanned control paradigm used in foreign countries, is presented. The examples of modeling the evolutionary dynamics of unmanned vessels in various operating conditions are considered: when a vessel passes an ice field with complex formations; movement of the vessel on a limited fairway; virtual simulation of an unmanned vessel under the influence of sea waves with a frequency spectrum.

Key words: unmanned ships, artificial intellect, modern disaster theory, intellectual support, remote control center.

Введение

24 апреля 2019 года, в России в рамках Национальной технологической инициативы и при поддержке Минпромторга РФ стартовал пилотный проект по безэкипажному судовождению с целью поддержки высоких технологий в наиболее перспективных направлениях морской отрасли. И уже 22 сентября 2020 года Минпромторг утвердил положения о запуске безэкипажных судов. Их испытания начнутся в 11 субъектах России.

Несмотря на все преимущества, у автоматизации кораблей есть и недостатки. Так, полностью автономными суда быть не могут, поскольку установленное оборудование требует контроля специалистов. Например, видеочамера, установленная на корабле, не всегда может дать четкое изображение оператору на станции управления, особенно в условиях плохой видимости или при сбоях в связи.

Ключевыми проблемами являются обеспечение надежности и безопасности. Для обеспечения

надежности и безопасности необходимо иметь концепцию управления безэкипажными судами.

1. Концепция безэкипажного управления

Концепция управляемого дистанционного эксперимента МПК (рис.1) определяет получение первичной информации и организацию ее передачи между отдельными подсистемами ЦДУ и потребителями (группой безэкипажных морских динамических объектов (МДО) в заданном районе эксплуатации) [1,2].

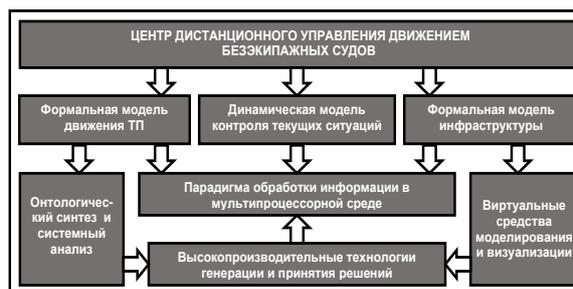


Рис. 1. Структурная схема ЦДУ

Программно-аппаратный комплекс ЦДУ ориентирован на решение широкого спектра задач обработки информации в условиях удаленного доступа к ее источникам с помощью модели управления, которая представлена иерархией взаимосвязанных компонент сбора, обработки, передачи и представления информации, разнесенных во времени и пространстве. Дерево функций интерпретации в ЦДУ представляет декомпозицию совокупности задач формирования структуры интерпретирующей системы и модели управления с использованием функциональных модулей ЦДУ. Принцип многофункциональности обеспечивает эффективное управление безэкипажным ТП и разрешение противоречий функционально-структурной организации ЦДУ.

В рамках парадигмы построения программного комплекса ЦДУ изучаются особенности ситуации в рамках концепции адаптивного поведения. Сложность объекта исследования, специфичность методов описания, анализа и прогнозирования состояния объекта, позволяют рассматривать задачу обеспечения эволюционной динамики группового управления морскими судами в предположении, что основными ее составляющими являются:

- определение местоположения в ситуационном пространстве взаимодействия на момент оценки ситуации,
- фиксация степени соответствия оцениваемого состояния с целевым,
- поиск путей достижения целевого состояния по критериям ресурсных затрат и степени риска.

Концептуальная модель обработки информации при интерпретации функционального пространства системы безэкипажного движения морских судов в сложной динамической среде, имеет вид:

$$U(Sub) = \left\langle \begin{matrix} E(Str): \\ \{T(t, \tau) \times A(D, K) \times Q(W)\} \rightarrow Y(R) \end{matrix} \right\rangle, \quad (1)$$

где $U(Sub)$ определяет множество стратегий управления, а ее компоненты представляют следующие структуры: $E(Str)$ – элементы, реализующие принцип безэкипажного управления; $T(t, \tau)$ – моменты времени, определяющие модель развития контролируемых ситуаций; $A(D, K)$ – множество элементов оперативной базы данных и знаний; $Q(W)$ – значения вектора входных воздействий (состояние нестационарной внешней среды и ТП); $\{T(t, \tau) \times A(D, K) \times Q(W)\}$ – множество закономерностей в данных; $Y(R)$ – множество правил обобщения информации; τ – интервал времени реализации.

Управляющая инфраструктура ЦДУ основана на реализации методов искусственного интеллекта (ИИ) [2,3] в динамических ситуациях и обеспечивает решение взаимосвязанных задач контроля мореходности в режиме УС [4] при оперативной обработке текущей информации в высокопроизводительной вычислительной среде. Структура интегрированного информационно-управляющего комплекса дистанционного управления ТП организована как сложная многоуровневая система поддержки управленческих решений:

$$U(DM) = \langle U(Ident), N(Risk), IP(MS), IT(Know) \rangle, \quad (2)$$

где $\langle \bullet \rangle$ – функциональные блоки системы: $U(Ident)$ – управление и идентификация компонент ТП, включающее диалоговую систему, анализ состояний приложений, выработку управляющих воздействий и практических рекомендаций по их реализации на основе проблемно-ориентированной динамической системы знаний; $N(Risk)$ – моделирование и оценка риска вырабатываемых решений, обеспечивающая представление данных с использованием системы динамической визуализации; $IP(MS)$ – информационное и программное обеспечение выполнения сценариев развития динамических ситуаций на базе высокопроизводительных технических средств; $IT(Know)$ – интеллектуальные технологии и структуры предсказательного моделирования и извлечения «скрытых» знаний, на основе «облачных» вычислений [5], интегрирующих информационную, функциональную и аппаратную конфигурацию.

Дерево функций ЦДУ представляет декомпозицию функций системы безэкипажного движения судов с целью детального исследования ее функциональных возможностей и анализа совокупности задач, реализуемых на различных уровнях иерархии. На базе дерева функций осуществляется формирование структуры системы и строится модель управления с использованием функциональных модулей ЦДУ. Принцип многофункциональности обеспечивает эффективное разрешение противоречий функционально-структурной организации ЦДУ.

2. Стратегия безэкипажного управления

В задаче планирования стратегий ЦДУ выделяется множество возможных состояний безэкипажных морских судов – элементов активной динамической системы, о параметрах мореходности, необходимых для эффективного управления безопасностью движения ТП. Формальный аппарат оценки функционального состояния и прогнозирования поведения ТП безэкипажных судов реализуется с помощью модели «сущность – связь» (ER-модель). Объекты реальной ситуации в этой модели представляются «сущностями» (entities), а ассоциации между ними – отношениями (relationship). Количество сущностей в отношении определяется *степенью отношения*. Отношение «назначение» при концептуальном моделировании ТП предполагает использование сущностей: «Система», «Судно», «Оценка состояния», «Прогноз» [2,3].

Рассматривая отношения степени n , можно формально представить для сущностей $Q_1(E), \dots, Q_n(E)$ отношение в виде набора упорядоченных n -кортежей:

$$R \in Q_1(E) \times \dots \times Q_n(E), \quad (3)$$

При условии, что

$$\varepsilon \subset \{Q_1(E), \dots, Q_n(E)\}, \quad (4)$$

ограничение $R[\varepsilon]$ представляет собой набор

$$\{r(\varepsilon), r \in R\}, \quad (5)$$

где $r(\varepsilon)$ – подкортеж, содержащий только экземпляры сущностей из ε .

Процедуры интеллектуальной поддержки (ИП) обеспечивают проведение математического

моделирования текущей ситуации с представлением результатов и визуализацией физических особенностей и динамической картины текущей ситуации в виде сжатого «когнитивного образа». Концептуальная модель моделирования поведения безэкипажных судов в составе ТП представляется в виде знакового ориентированного графа G_1 с тремя вершинами А,В,С и соответствующей матрицей смежности $A(D_1)$ [2,3]:

$$M(G_1) = F_1(A, B, C), \quad A(D_1) = F_2(A, B, C), \quad (6)$$

где А – текущая ситуация; В – уровень информационного обеспечения; С – уровень ИП принятия решения.

Определение 1. Динамика эволюционного процесса должна отвечать требованию по быстрдействию и адекватности, в соответствии с которыми конструируется эталонное уравнение для выхода интерпретирующей системы y , которому необходимо подчинить движение судов безэкипажного управления.

Определение 2. Задачей синтеза системы взаимодействия судов безэкипажного управления является отыскание такого закона управления, чтобы замкнутая система $F(t, x, u(\bullet))$, $y = g(t, x)$ отвечала требованиям к динамике, которые выражаются эталонным уравнением

$$y^{(1)} = F(y, v), \quad (7)$$

где для y и v – параметры выхода, которые реализуются вдоль траекторий движения эволюционирующей системы.

Следствие 1. Движение, задаваемое уравнением (7), реализуемо, если для любого (t, x, v) найдется значение управляющего воздействия u , которое обеспечит равенство:

$$F(y, v) = \varphi(t, x, u). \quad (8)$$

Следствие 2. Для существования и единственности решения уравнения

$$F(\bullet) = \varphi(t, x, u) \quad (9)$$

относительно u достаточно условия

$$y' = \varphi(t, x, u), \quad \varphi = G_t^{-1}(t, x) + G_x^{-1}(t, x) \cdot f(t, x, u), \quad (10)$$

где при неполной информации о исходной математической модели $x = f(t, x, u)$, $y = g(t, x)$ не удастся построить управление как явную функцию остальных переменных. Следовательно, необходимо реализовать алгоритм управления, который позволяет приблизиться к решению уравнения $\varphi(t, x, u)$, определяющего условие разрешимости задачи безэкипажного управления.

Соотношения (7) – (10) позволяют формализовать нечеткую формальную систему (НФС) контроля ситуаций безэкипажного управления для различных приложений морских судов. Используя структуру <if – then>, можно реализовать модели логического вывода в случае интерпретации эволюционной динамики безэкипажных морских судов в сложной динамической среде

Состояния рассмотренных ситуаций могут быть отображены в виде *матрицы переходов*. Например, применение функциональных пространств СТК [1] для трех ситуаций S_0, S_1, S_2 позволяет записать:

$$\begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 \\ S_0 & 0 & 1 & 0 \\ S_1 & 0 & 0 & 1 \\ S_2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где S_0 – исходное состояние; S_1 – переход в состояние устойчивого равновесия (возникновения целевого аттрактора); S_2 – потеря устойчивости системы (возникновение катастрофы).

Переходы

$$S_0 \rightarrow S_1, S_1 \rightarrow S_2 \quad (12)$$

в процессе эволюции ситуаций могут быть представлены в виде цепочки преобразований

$$X \rightarrow Y, Z \rightarrow V. \quad (13)$$

Это означает, что первая структура, находящаяся в ситуации X , взаимодействует со второй, имеющей состояние Y , но эта структура уже изменила свое состояние Y на Z и ориентирована на состояние V . Взаимодействие продолжается, если транзакция $X \rightarrow Y$ не является перекрестной, и прервется при нарушении сформулированного условия.

3. Программный комплекс безэкипажного управления

Важнейшей задачей разработки программного комплекса ЦДУ является осуществление быстрого и гибкого динамического взаимодействия оператора с программной системой. Пульт дистанционного управления ТП безэкипажных МДО (рис.2а) [6] дополняется экраном оператора на основе представления, используемого в бортовых интеллектуальных системах (ИС) (рис.2б) [2,3].



а)



б)

Рис. 2. Экран оператора программного комплекса оценки поведения безэкипажного судна: а – стандартная зарубежная модель; б – модель экрана оператора бортовой ИС

В отличие от парадигмы безэкипажного управления, используемой в зарубежных странах [6], новый подход имеет принципиальное отличие при интерпретации процессов и явлений, характеризующих эволюционную динамику безэкипажных морских судов (рис. 3).

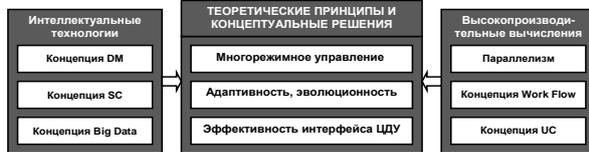


Рис. 3. Концепция безэкипажного управления морскими судами

Как следует из этого рисунка, теоретические принципы концептуальных решений стратегии безэкипажного управления морскими судами базируются на следующих особенностях:

- концепция интегрированного ЦДУ, функционирующего на основе информации от бортовых ИС и МПК [2,3] в режиме UC [4];
- гибридные технологии [7], реализующие комплексный подход к моделированию и интерпретации динамических ситуаций на основе концепций Data Mining (DM) и Soft Computing;
- концепция Big Data [8] обеспечивающая адаптацию и моделирование динамики безэкипажных МДО с использованием больших наборов данных из различных источников, включая вычислительно-интенсивные (Computationally Intensive) и информационно-интенсивные (Data Intensive) интерпретации описания динамики взаимодействия.
- модель управления риском, обеспечивающая идентификацию рискованных ситуаций, оценку риска и управление риском при выборе решений и реализации стратегии безэкипажного управления.

Ниже рассмотрены примеры моделирования эволюционной динамики безэкипажных судов в различных условиях эксплуатации.

4. Практические приложения безэкипажного управления

Пример 1. Выработка стратегических решений при функционировании ЦДУ позволяет формализовать сложные задачи моделирования динамики безэкипажных судов в процессе эволюции. На рис.4 представлен процесс маневрирования морского судна при прохождении ледового поля со сложными образованиями.



а)



б)

Рис.4. Результаты моделирования поведения безэкипажного судна при движении в битых льдах (а) и торосах (б) на основе стандартной модели и динамической нейронной сети глубокого обучения

Пример 2. Рассмотрим характерный пример возникновения смены состояний при движении безэкипажного судна на ограниченном фарватере. В этих условиях возможно возникновение критических режимов – ходового дифферента и удара корпуса о ложе фарватера (рис.5)

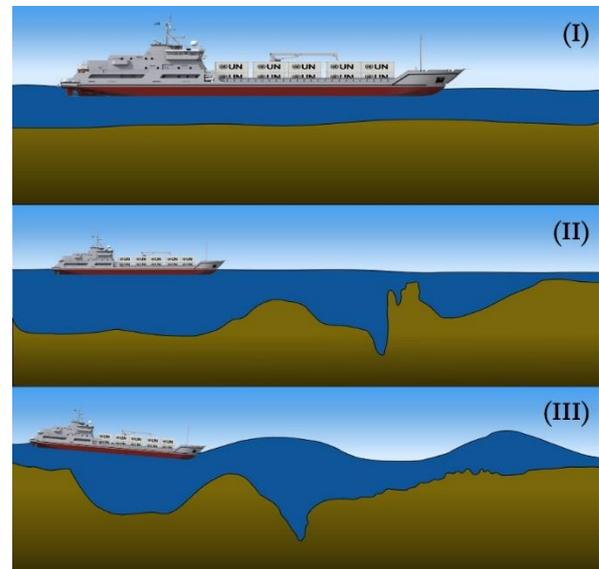
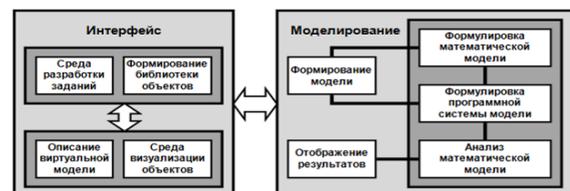


Рис. 5. Фрагменты динамической визуализации на ограниченном фарватере: I,II– слабая и сильная конфигурации рельефа дна; III – нерегулярное волнение и сложный рельеф дна

Пример 3. Рассмотрим пример виртуального моделирования безэкипажного судна под воздействием морского волнения с частотным спектром, описывающим смешанное волнение Баренцева моря (рис.6).



а)

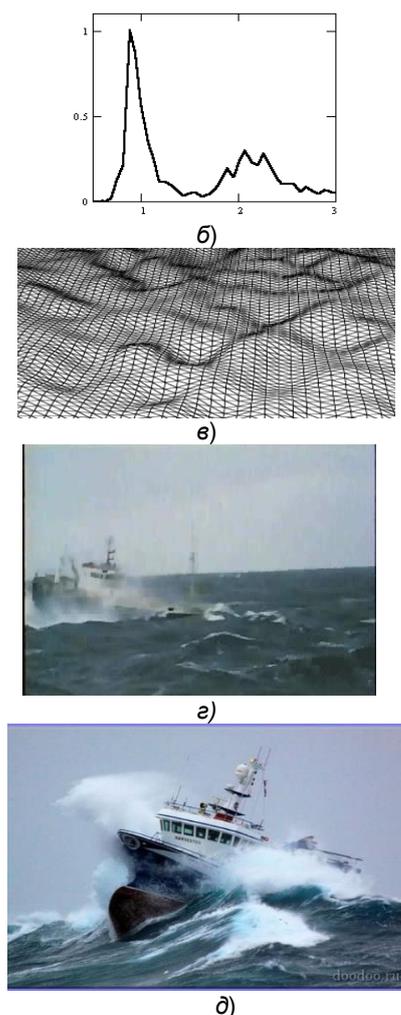


Рис.6. Система виртуального моделирования (а), частотный многопиковый спектр волнения (б), динамическая визуализация волнового поля (в) и безэкипажных судов в нестационарной среде (в),(д)

Заключение

Новый подход к реализации концепции безэкипажного судоходства, характеризующий эволюционную динамику безэкипажных морских судов при интерпретации процессов и явлений, базируется на следующих особенностях:

- концепция интегрированного ЦДУ, функционирующего на основе информации от бортовых ИС и МПК в режиме УС;
- гибридные технологии, реализующие комплексный подход к моделированию и интерпретации динамических ситуаций на основе концепций DM и SC;
- концепция BD обеспечивающая адаптацию и моделирование динамики безэкипажных МДО с использованием больших наборов данных из различных источников, включая вычислительно-интенсивные и информационно-интенсивные интерпретации описания динамики взаимодействия;
- модель управления риском, обеспечивающая идентификацию рискованных ситуаций, оценку риска и управление риском при выборе решений и реализации стратегии безэкипажного управления.

Литература

1. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург.: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
2. Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2018. – 384 с.
3. Бондарев В.А., Нечаев Ю.И. Искусственный интеллект в чрезвычайных ситуациях мореплавания. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. - 336 с.
4. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007.
5. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // Preprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>
6. Fourth Industrial Revolution / N.Nikitakas. University of the Aegean. 7 Okt 2019.
7. Figueira G., Almada-Lobo B. Hybrid simulation-optimization methods: A taxonomy and discussion // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2014. – Т. 46. – С. 118–134.
8. Szalay A. Extreme data-intensive scientific computing // Computing in Science & Engineering. – 2011. – Т. 13. – №. 6. – С. 34-41.

References

1. Nechaev Ju.I. Teorija katastrof: sovremennyj podhod pri prinjatii reshenij [Catastrophe theory: a modern approach to decision making]. Sankt-Peterburg.: Art-Jekspress, 2011. 392 s.
2. Nechaev Ju.I. Sovremennye problemy informatiki i vychislitel'noj tehniki [Modern problems of informatics and computer technology]. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress, 2018. 384 s.
3. Bondarev V.A., Nechaev Ju.I. Iskusstvennyj intellekt v chrezvychajnyh situacijah moreplavanija [Artificial intellect in emergency navigation]. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress, 2017. 336 s.
4. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007.

5. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared. Preprint arXiv:0901.0131, 2008 [Jelektronnyj resurs]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>
6. Nikitakas N. Fourth Industrial Revolution. University of the Aegean. 7 Okt. 2019.
7. Figueira G., Almada-Lobo B. Hybrid simulation-optimization methods: A taxonomy and discussion. Simulation Modelling Practice and Theory. 2014. Т. 46. S. 118–134.
8. Szalay A. Extreme data-intensive scientific computing. Computing in Science & Engineering. 2011. Т. 13. №. 6. S. 34-41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виталий Александрович Бондарев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, декан судоводительского факультета, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236035, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: va.bondarev@gmail.com

Vitaly A. Bondarev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of navigation, Dean of the navigation faculty, Baltic Fishing Fleet State Academy, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236035, Russian Federation, e-mail: va.bondarev@gmail.com

Владимир Алексеевич Волкогон, кандидат экономических наук, доцент, ректор, Калининградский технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: rector@klgtu.ru

Vladimir A. Volkogon, Ph.D. (Econ), Associate Professor, Rector, Kaliningrad Technical University, Sovetsky Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: rector@klgtu.ru

Юрий Иванович Нечаев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовождения, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236035, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: sudovod@bga.gazinter.net

Yuri I. Nechaev, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Navigation, Baltic Fishing Fleet State Academy, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236035, Russian Federation, e-mail: sudovod@bga.gazinter.net

Изумруд Рамазановна Рагулина, кандидат географических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236035, Калининград, ул. Молодежная, 6, e-mail: izragulina@mail.ru

Izumrud R. Ragulina, Ph.D. (Geogr), Associate Professor of the Department of Safety of Navigation, Baltic Fishing Fleet State Academy, Molodezhnaya, 6, Kaliningrad, 236035, Russian Federation, e-mail: izragulina@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.93'1

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.088

Выбор архитектуры семантической сегментации изображений для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения

Р.К. Поляков¹, К.Г. Кузьминов¹, А.Б. Тристанов¹¹ Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В работе изложены результаты исследований авторов, предметом которых является семантическая сегментация изображений является одной из ключевых проблем в области компьютерного зрения. В статье обстоятельным образом раскрыты особенности выбора архитектуры семантической сегментации изображений для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения. Авторами показаны существующие перспективные архитектуры и дана их сравнительная оценка. Дана сравнительная характеристики наиболее распространённых методов. Из всего многообразия архитектур как наиболее оптимальный был выбран Faster-R-CNN Inception v2 и разработана алгоритм и система, позволяющая использовать его непосредственно для анализа и классификации изображений жестяных банок по признаку герметичности. Приведена общая схема процесса подготовки обучающей выборки изображений. Описаны основные характеристики алгоритма анализа и классификации изображений жестяных банок по признаку герметичности для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения.

Ключевые слова: семантическая сегментация изображений; система технического зрения, методы, искусственные нейронные сети, машинное обучение, контроль качества

The choice of semantic architecture segmentation of images for the prototype of a self-learning software and hardware complex of technical vision

Ruslan K. Polyakov¹, Konstantin G. Kuzminov¹, Alexander B. Tristanov¹¹Kaliningrad state technical university, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of the authors' research, the subject of which is the semantic segmentation of images- one of the key problems in the field of computer vision. The article describes in details the features of the choice of the architecture of semantic image segmentation for the prototype of the self-learning hardware and software complex of technical vision. The authors show the existing promising architectures and give their comparative assessment. Comparative characteristics of the most common methods are given. Of the whole variety of architectures, Faster-R-CNN Inception v2 was chosen as the most optimal and an algorithm and system was developed that allows it to be used directly for analyzing and classifying images of cans based on tightness. The general scheme of the process of preparing a training sample of images is given. The main characteristics of the algorithm for analyzing and classifying images of cans based on tightness for a prototype of a self-learning software and hardware complex of technical vision are described.

Keywords: semantic image segmentation; vision system, methods, artificial neural networks, machine learning, quality control

Введение

В настоящее время семантическая сегментация изображений является одной из ключевых проблем в области компьютерного зрения. В целом семантическая сегментация изображений – одна из высокоуровневых задач, которая открывает компьютеру путь к полному пониманию сцены на получаемом изображении.

Авторы согласны с мнением, что под семантической сегментацией стоит понимать разделение изображения на отдельные группы пикселей, области, соответствующие одному объекту с одновременным определением типа объекта в каждой области.

Таким образом, разрабатываемый алгоритм должен с достаточной для работы в реальном времени скоростью анализировать поступающее с видеокамеры изображение, выделять границы объекта (жестяной банки) и одновременно детектировать наличие повреждений на банке. Далее алгоритм должен сигнализировать о наличии

повреждения на банке либо оператору (в случае полуавтоматической отбраковки) либо подавать сигнал на автоматическое устройство сброса банки с конвейера (в случае автоматической отбраковки).

1. Современные алгоритмы задач детектирования

На сегодняшний день существующие методы семантической сегментации изображений достаточно многочисленны и разнообразны.

В целом работа сверточной сети для семантической сегментации состоит из трех этапов:

1. Изображение подвергается классификации, при этом классификатор делает прогноз для ввода в целом.

2. Далее производится обнаружение, позволяющее предсказать классы и получить необходимую информацию о пространственном расположении таких классов.

3. Наконец, продвинутые нейронные сети производят попиксельную сегментацию,

предсказывая принадлежность каждого пиксела на изображении.

Для наших целей (определение поврежденной продукции) пункт 3- попиксельная сегментация – избыточна, поэтому рассматриваются только сети, выдающие результат в виде локализации объекта простой прямоугольной рамкой.

Сверточные нейронные сети, такие как CNNs или ConvNets являются важными инструментом глубокого обучения. Они используются для обнаружения и классификации изображений, а также для задач распознавания. CNNs реализуются как серия взаимосвязанных слоев. Слои состоят из повторяющихся блоков сверточных, RELU (выпрямленных линейных блоков) и слоев объединения. Сверточные слои свертывают входные данные с помощью набора фильтров. Фильтры автоматически распознают благодаря пред обучению сети. Уровень ReLU добавляет нелинейность в сеть, что позволяет сети аппроксимировать нелинейное отображение между пикселями изображения и семантическим содержимым изображения.

Для сверточных нейронных сетей требуется Deep Learning Toolbox™. Обучение и прогнозирование поддерживаются на графическом процессоре CUDA® -capable с вычислительной способностью 3,0 или выше. Рекомендуется использовать графический процессор и требуется Parallel Computing Toolbox™.

Используя архитектуру CNNs можно построить сеть, которую можно применить для семантической сегментации или обучения. С помощью обученной сети можно вести обнаружение объектов и классифицировать, например изображения жестяных банок по признаку герметичности. Также можно извлекать функции из предварительно подготовленной сети и использовать эти функции для обучения классификатора. Более подробно эволюцию сверточной нейронной сети рассмотрим ниже. При этом в ходе анализа протестируем имеющиеся архитектуры на практике и выберем наиболее подходящую, для реализации текущего этапа проекта.

1.1 R-CNN

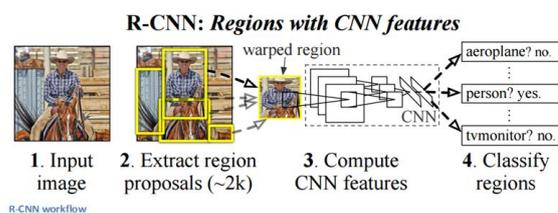
Впервые архитектура R-CNN была предложена в 2013 году исследователями R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik из UC Berkley [1]. Большинство экспертов склоняются к мнению, что их научная работа под названием «Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation» [2] открыла совершенно новый подход и представила миру новый ранее не используемую модель в основе которой находился подход основанный на регионах с СНС-признаками (RCHC, regions with CNN features, R-CNN). Данная работа внесла существенный вклад и оказала значительное влияние, чем ранее опубликованные работы по сетевым архитектурам.

По мнению авторов статьи, они предлагают простой и масштабируемый алгоритм обнаружения, который улучшает среднюю точность (mAP) более чем на 30% по сравнению с предыдущим лучшим результатом на VOC 2012 - достижение составляют 53,3%. Точность данного решения достигается путём предварительного выделения объектов на изображении ограничивающими рамками.

Предложенный подход команды учёных из UC Berkley [2] сочетает в себе две ключевые идеи: (1) можно применять высокомоощные сверточные нейронные сети (CNNs) к предложениям снизу вверх региона (region proposal), чтобы локализовать и сегментировать объекты и (2) когда обучающих данных недостаточно, используется тонкая настройка, что дает значительный прирост производительности.

Авторы в своей статье отмечают, что в их алгоритме можно использовать любой метод предложения регионов, в том числе без указания информации о классе (class agnostic region proposal).

Ниже на рисунке 1 показан рабочий процесс R-CNN, который был апробирован R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik в своей работе [2].



Источник: Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [2]

Рис. 1. Рабочий процесс R-CNN

Используя метод селективного поиска (selective search) было сгенерировано около 2000 регионов. Далее регионы были обработаны с помощью обученной CNN (авторы применяли AlexNet), благодаря которой они смогли получить вектор признаков для каждого региона. Далее извлечённый вектор признаков подавался на вход набора линейных классификаторов (linear SVM, англ. SVM, support vector machine, метод опорных векторов) после чего выполняется их классификация. Одновременно данный вектор подается на вход регрессии, при помощи которой вычисляются точные координаты ограничивающей рамки.

Из рисунка 1 видно, что рабочий процесс R-CNN выглядит следующим образом:

1. Входное изображение.
2. Формирование предлагаемых регионов (~2000).
3. Вычисление CNN -признаков.
4. Классификация регионов.

На следующем этапе происходит подавление регион не имеющие максимумов (non-maximum suppression).

Далее представлена схема работы алгоритма [2]:

1. На изображении выделяются регионы, которые содержат искомый объект, при этом применяется метод selective search,
2. Регион претендент (BBox региона) отображается в квадрате 227x227, используя аффинное преобразование. При этом BBox региона претендента получает кайму в 16 пикселей.
3. Далее на вход сети CNN подается BBox региона [3].
4. Со слоя FC7 сети, снимается вектор особенностей размерности 4096. Данный вектор обрабатывается методом опорных

векторов (SVM), где он классифицируется по схеме один против всех.

5. Подавая полученный вектор на вход линейного регрессора, алгоритм восстанавливает позиции оцениваемого объекта.

Необходимо отметить, что на третьем этапе существует потенциальная возможность выбора иной структуры свёрточной сети (например, VGG16) с целью генерации отличного от предыдущего вектора особенностей [4]

Более подробно схема работы представленной выше сети, описана в статьях [2, 4].

1.2 Fast R-CNN

Бесспорно, архитектура R-CNN как было ранее указана, имеет ряд преимуществ, но она так же обладает и недостатками, которые в большинстве своём связаны с временными затратами. Далее рассмотрим основные недостатки, вытекающие из особенности архитектуры R-CNN:

1. Необходимо в два этапа натренировать CNN: в начале производится тренировка без точной разметки, а далее производится тонкая настройка (fine-tuning) для 20 классов.
2. Требуется натренировать набор SVM по одному для каждого из класса.
3. Необходимо натренировать линейные регрессоры для определения позиций объекта.
4. Процесс детектирования и классификации требует до 47 секунд на одно изображение, если используется свёрточная сеть по типу VGG16.

Главное отличие данного подхода от R-CNN в том, что в Fast R-CNN карта особенностей генерируется для всего изображения, а не для отдельных претендентов на изображении. Скорость же время вывода достигается путём использования специального слоя, в котором происходит предобработка для вычисления карт каждого отдельного претендента.

Так же в данной архитектуре не используется тренировка отдельного SVM для каждого класса, а применяется softmax слой. Также в сети не используются отдельные линейные регрессоры, вместо этого натренирован, отдельный слой нейронной сети.

В данной архитектуре время детекции объекта значительно улучшено, но все еще недостаточно для работы в реальном времени.

В этой связи ниже рассмотрим более современные подходы, такие как Faster R-CNN и Faster R-CNN Inception.

1.3 Faster R-CNN u Faster R-CNN Inception

В архитектуре Faster R-CNN генерация претендентов selective search заменяется небольшой нейронной сетью, которая применяет уже имеющуюся карту особенностей.

Таким образом, Faster R-CNN объединяет в себе две сети: сеть предсказания регионов (RPN – Region Proposal Network) для создания предсказаний расположения регионов и сеть, использующая эти предложения для обнаружения объектов. Основное

отличие здесь от Fast R-CNN заключается в том, что в дальнейшем используется выборочный поиск для создания предложений регионов. Временная оценка генерирования предсказаний регионов в RPN снижается за счет того, что при выборочном поиске RPN разделяет большинство вычислений с сетью обнаружения объектов. Особенность RPN подхода заключается в том, что он ранжирует рамки регионов (называемых также якорями) и предлагает наиболее вероятные объекты.

Якорь – это по сути прямоугольник, показывающий границы объекта. В дефолтной конфигурации Faster R-CNN для позиционирования объекта используется 9 якорей разного размера, которые накладываются на объект.

Следует отметить, что для обучения Faster R-CNN обычно используется предтренированная сеть, уже «знающая» как располагать якоря для десятков видов объектов. Наиболее популярны в этом плане датасет Pascal VOC (20 категорий) и COCO dataset (80 категорий объектов, натренирован на 300 тыс. картинок). Для целей данной работы использовалась сеть, тренированная именно на датасете COCO.

Вывод сети предсказаний регионов (RPN) представляет собой набор рамок / предложений, которые будут проверяться классификатором и регрессором, чтобы в конечном итоге проверить наличие объектов. Точнее говоря, RPN предсказывает возможность того, что якорь является фоном либо объектом и уточняет якорь.

После работы RPN получаем регионы (боксы) разных размеров. Разные размеры означают разные картинки на входе CNN. Создать эффективную архитектуру для работы с картинками разного размера достаточно проблемно. Однако эта проблема упрощается применением ROI Pooling – объединением по областям интересов. Модуль ROI сводит карты интереса в один размер. Модуль разделяет входную карту интересов на фиксированное количество регионов, а затем применяет Max-pooling к каждому региону, делая вывод независимым от размера ввода.

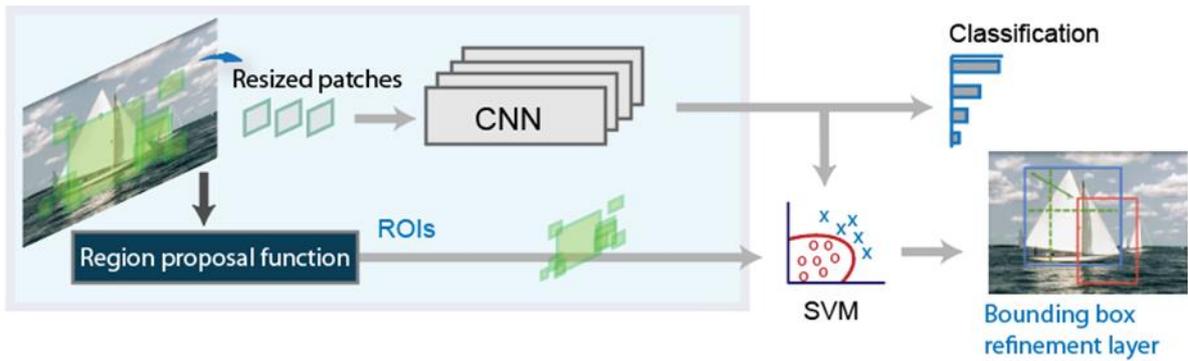
Тренировка может производиться разными способами – отдельно тренировать RPN, классификатор и регрессор либо тренировать их одновременно. Последнее дает выигрыш по времени в полтора раза при сохранении точности. Именно данный метод тренировки используется в данной работе.

В качестве свёрточной сети обычно используется либо VGG16, либо ZF [6], [7], хотя по большому счету может использоваться практически любой классификатор. В целом архитектура сети выглядит следующим образом:

Таким образом, в данной архитектуре весь процесс реализован с помощью одной нейронной сети, что уже позволяет вести семантическую сегментацию изображений в режиме реального времени.

Применение Inception v2 в качестве свёрточной сети значительно повышает точность алгоритма, все еще позволяя использовать его в режиме реального времени.

Обнаружение объекта с использованием архитектуры R-CNN для различных подходов представлено ниже на рисунках 2 – 4.

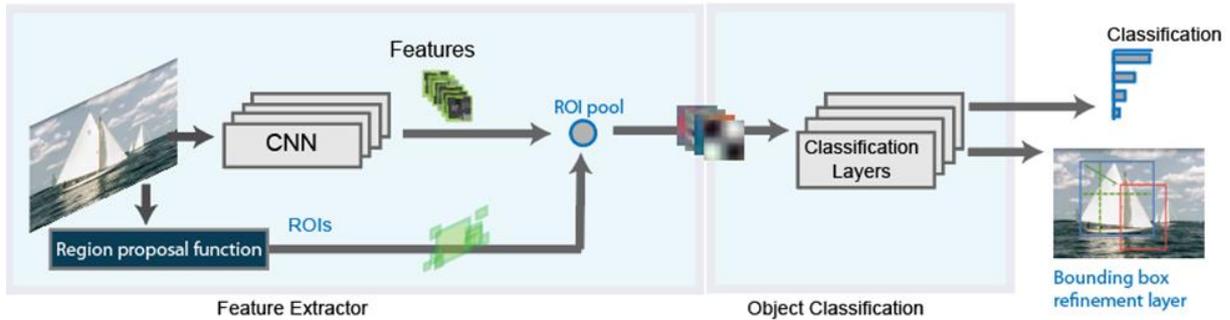


Источник: R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN Basics(<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/faster-r-cnn-basics.html>)

Рис. 2. R-CNN

Как и в детекторе R-CNN, детектор Fast R-CNN [2] также использует алгоритм, подобный Edge Boxes, для создания предложений регионов. В отличие от детектора R-CNN, который обрабатывает и изменяет размеры предложений региона, детектор Fast R-CNN обрабатывает весь образ. В то время как детектор R-

CNN должен классифицировать каждый регион, Fast R-CNN объединяет возможности CNN, соответствующие каждому предложению региона. Fast R-CNN более эффективен, чем R-CNN, потому что в детекторе Fast R-CNN вычисления для перекрывающихся областей являются общими.

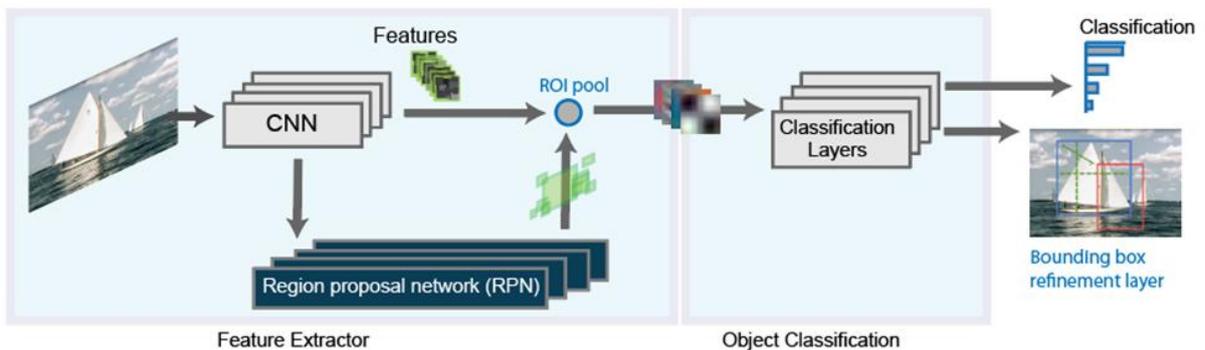


Источник: R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN Basics

Рис. 3. Fast R-CNN

Faster R-CNN не использует внешние алгоритмы, такие как Edge Boxes, а добавляет сеть RPN для создания предложений регионов непосредственно в

сети, что позволяет быстрее и лучше настраивать собственные данные.



Источник: R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN Basics

Рис. 4. Faster R-CNN

Компромисс между точностью и размером объектов при обнаружении объектов на разных архитектурах представлен на рис. 4. Ниже в таблице

1 представлена сравнительная характеристика наиболее распространённых методов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики наиболее распространённых методов

Алгоритм	Характеристики	Прогноз времени / изображения	Ограничения
CNN	Делит изображение на несколько областей, а затем классифицирует каждую область на различные классы.	-	Нужно много регионов для точного прогнозирования. Больше времени для вычислений.
R-CNN	Использует выборочный поиск для генерации регионов. Извлекает около 2000 регионов из каждого изображения.	40-50 секунд	Использует три разные модели для прогнозирования. Требуется больше времени для вычислений. Кроме того каждый регион передается на CNN отдельно.
Fast R-CNN	Каждое изображение передается только один раз в CNN, и карты характеристик извлекаются. Выборочный поиск используется на этих картах для создания прогнозов. Объединяет все три модели, используемые в R-CNN вместе.	2 секунды	Выборочный поиск медленный и, следовательно, время вычислений все еще велико.
Faster R-CNN	Заменяет метод выборочного поиска сетью предложения региона (RPN), что делает алгоритм намного быстрее.	0,2 секунды	Предложение объекта требует времени, и, поскольку есть разные системы, работающие одна за другой, производительность систем зависит от того, как работала предыдущая система.

Источник: Составлено автором статьи

Для дальнейшей работы была выбрана архитектура Faster R-CNN Inception V2, как оптимальная по параметрам скорости/точности. Стоит также отметить, что разработанная методика позволяет достаточно легко менять модели (например на SSD) в случае, если это больше подходит для специфики работы каждого конкретного производства.

2. Процесс подготовки обучающей выборки изображений

Для первой реализации алгоритма был создан простой тестовый стенд, представляющий собой однотонный экран, на фоне которого находится банки, изображение которых передается через HD-камеру в детектор. На предприятии были получены образцы банок с характерными повреждениями.

Далее на рис. 5 представлены наиболее характерные повреждения продукции на производстве:



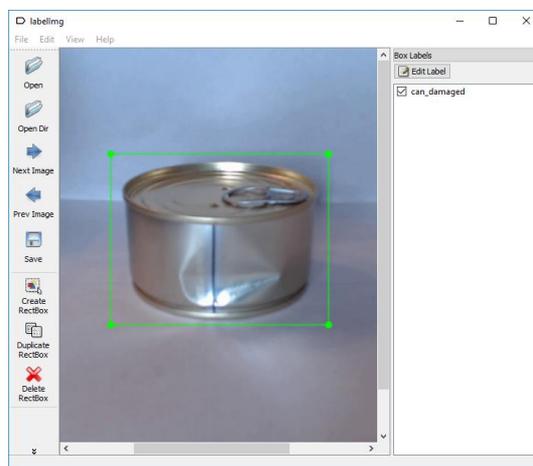
Источник: Составлено автором статьи

Рис. 5. Характерные повреждения продукции в производстве

Таким образом, для тестового прогона был создан DataSet из порядка 200 изображений поврежденных и 200 изображений неповрежденных объектов в разных местах тестового стенда, что должно было создать достаточную вариативность для обучаемой модели и дать ей возможность «видеть» объект с разных ракурсов.

Далее, для передачи объектов в классификатор необходимо обозначить границы каждого объекта на изображении (см. рис. 6). В настоящее время разработано несколько программ для обозначения границ объекта, для целей данной работы была выбрана freeware программа LabelImg.

Labelimg - графический инструмент для аннотации изображений. Он написан на Python и использует Qt для своего графического интерфейса¹. Аннотации сохраняются как файлы XML в формате PASCAL VOC, формат, используемый ImageNet. Более подробную информацию можно найти на сайте Github (<https://github.com/tzutalin/labelImg>).



Источник: Составлено автором статьи

Рис. 6 - Процесс подготовки разметки изображения в программе Labelimg

В результате работы для каждого изображения был сформирован файл формата xml.

Пример разметки xml для приведенного выше изображения:

```
<annotation>
  <folder>can_damaged</folder>
```

¹ <https://pypi.org/project/labelImg/>

- сигнализация о наличии дефекта на анализируемом объекте.

Следует также отметить, что программа построена таким образом, что исходя из требований производства, основная определяющая модель может быть заменена на любую другую, например на SSD. Это может быть сделано, в случае если требуется, например, большее быстродействие, а повреждения определить проще. Для имеющихся целей и задач выбрано оптимальная модель.

Работа выполнена в соответствии с утвержденным Федеральным агентством по рыболовству тематическим планом прикладных научных исследований, выполняемых коллективом университета в 2020 году, в рамках тематик: «Исследование прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения в условиях поточного производства предприятий рыбохозяйственного комплекса».

Литература

1. J. Uijlings, K. van de Sande, T. Gevers, and A. Smeulders. "Selective search for object recognition." IJCV, 2013.
2. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation." In CVPR, 2014. arXiv:1311.2524
3. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. Hinton. "ImageNet classification with deep convolutional neural networks." In NIPS, 2012.
4. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. "Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation." TPAMI, 2015
5. R. Girshick, "Fast R-CNN," in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015.
6. K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In ICLR, 2015.
7. M. D. Zeiler and R. Fergus, "Visualizing and understanding convolutional neural networks," in European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.
8. Polyakov R.K., Gordeeva E.A. Industrial Enterprises Digital Transformation in the Context / "Industry 4.0" Growth: Integration Features / the Vision Systems for Diagnostics / the Food Packaging Sealing Under the Conditions / a Production Line под ред. S. Ashmarina, A. Mesquita, M. Vochozka, Cham: Springer International Publishing, 2020. 590–608 с.
9. Поляков Р.К., Кузьминов К.Г., Долгий Н.А. Методика диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения. Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 3. № 4(42). С. 109 – 116

References

1. J. Uijlings, K. van de Sande, T. Gevers, and A. Smeulders. "Selective search for object recognition." IJCV, 2013.
2. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation." In CVPR, 2014. arXiv:1311.2524
3. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. Hinton. "ImageNet classification with deep convolutional neural networks." In NIPS, 2012.
4. R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. "Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation." TPAMI, 2015
5. R. Girshick, "Fast R-CNN," in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2015.
6. K. Simonyan and A. Zisserman. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In ICLR, 2015.
7. M. D. Zeiler and R. Fergus, "Visualizing and understanding convolutional neural networks," in European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.
8. Polyakov R.K., Gordeeva E.A. Industrial Enterprises Digital Transformation in the Context / "Industry 4.0" Growth: Integration Features / the Vision Systems for Diagnostics / the Food Packaging Sealing Under the Conditions / a Production Line под ред. S. Ashmarina, A. Mesquita, M. Vochozka, Cham: Springer International Publishing, 2020. 590–608 с.
9. Polyakov R K, Kuzminov K G и Dolgij N A 2018 DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF FOOD PACKAGING TIGHTNESS IN CONDITIONS OF FLOW-LINE PRODUCTION FOR THE PROTOTYPE OF SELF-LEARNING SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX OF ARTIFICIAL VISION Mar. Intellect. Technol. 3 109–15

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Константинович Поляков, кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательской деятельности, Калининградский государственный технический университет 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Ruslan K. Polyakov, Ph.D. (Econ), Associate Professor, the Head of Department of Scientific Research, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Константин Геннадьевич Кузьминов, ведущий специалист в области машинного обучения и компьютерного зрения ООО "ИНТРИК", Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: zal1357@gmail.com

Konstantin G. Kuzminov, Leading expert in the field of machine learning and computer vision LLC INTRLIK Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation e-mail: zal1357@gmail.com

Александр Борисович Тристанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и информационных технологий, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, старший научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, 684034 Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул.Мирная, д. 7, e-mail: alextristanov@mail.ru

Alexander B. Tristanov, the docent, Ph.D. (Eng), the Head of the Department of Informatics and IT, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: alextristanov@mail.ru
the Senior Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Mirnaya str., 7, Paratunka, Elizovskiy district, Kamchatka region, 684034, Russian Federation, e-mail: alextristanov@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5.08

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.075

Автоматизация контроля и управления производством рыбных консервов повышенной безопасности

С.П. Сердобинцев¹, Н.С. Будченко¹, Н.А. Долгий¹

¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассматривается комплекс вопросов, способствующих повышению безопасности рыбных консервов как важнейшего показателя качества пищевого продукта и оптимизации расхода ресурсов. Показана целесообразность замены традиционного метода орошения блоков замороженной рыбы на электроконтактный способ, который существенно повышает производительность и улучшает качество размороженного сырья. Уменьшение ручного труда в рыбноконсервном производстве может быть достигнуто использованием роботов и робототехнических комплексов на стадиях приемки и порционирования сырья, фасования продукта, проверки герметичности и удаления негерметичных консервов. Применение системы технического зрения позволяет организовать непрерывный дистанционный контроль закаточного шва и изменять параметры настройки закаточной машины с целью достижения необходимой герметичности. Показано, что безопасность производства консервов может быть повышена облучением рабочих поверхностей продукта и оборудования ультрафиолетовым излучением.

На безопасность консервов оказывают влияние практически все технологические операции рыбноконсервной линии. Анализ работ по технологии продуктов из гидробионтов и созданию автоматизированных консервных линий позволил выделить мероприятия по дальнейшему совершенствованию производства и хранения рыбных консервов.

Ключевые слова: рыбные консервы, безопасность продукта, дефростация, электроконтактный способ, ультрафиолетовое облучение, система технического зрения, контроль закаточного шва, адаптивное управление

Automation of control and management of enhanced safety canned fish production

Stanislav P. Serdobintsev¹, Natalia S. Budchenko¹, Nikolay D. Dolgiy¹

¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation

Abstract. The article deals with a set of issues that contribute to improving the safety of canned fish as an important indicator of food quality and the resource consumption optimization. The utility of replacing the traditional method of irrigation of frozen fish blocks with an electric contact method is shown, the latter significantly increasing productivity and improving the quality of thawed raw materials. Reduction of manual labor in fish canning production can be achieved by using robots and robotic systems at the stages of acceptance and portioning of raw materials, product packaging, leak testing and removal of leaky canned food. The use of a technical vision system allows to organize continuous remote control of the sealing seam and change the settings of the sealing machine in order to achieve the necessary tightness. The safety of canned food production is shown to be increased by irradiating the working surfaces of the product and equipment with ultraviolet radiation.

The safety of canned food is influenced by almost all technological operations of the fish canning line. The analysis of investigations into the technology of products from hydrobionts and the development of automated canning lines has allowed to identify measures to further improve the production and storage of canned fish.

Key words: canned fish, product safety, defrosting, electric contact method, ultraviolet irradiation, vision system, sealing seam control, adaptive control

Введение

Консервы изготавливают на рыбноконсервных плавучих базах и береговых рыбообработывающих предприятиях. В нашей стране в настоящее время эксплуатируются две плавбазы «Петр Житников» и «Всеволод Сибирцев», которые находятся в Дальневосточном регионе. В Калининградской области расположены 5 крупных рыбообработывающих предприятий, которые производят около 30% общего выпуска консервов в стране.

Безопасность является важнейшим показателем пищевого продукта. На безопасность оказывают влияние практически все технологические операции производства рыбных консервов [1].

Качество продуктов формируется в той или иной степени в ходе каждой технологической операции консервной линии.

Результаты исследования

Оптимальные технологии консервирования гидробионтов обеспечиваются дифференцированными способами раздельного сырья на тушку, филе и мелкие кусочки.

Применяют компоненты, повышающие вододерживающие свойства белков, используют щадящие режимы предварительной тепловой обработки, формование, вакуумирование, введение связующих добавок и ароматизаторов. Разработанные технологии позволяют использовать для производства стерилизованных консервов все объекты океанического промысла, независимо от их

специфических особенностей. Наиболее рациональным направлением консервирования является производство консервов на основе бланшированных полуфабрикатов. Рассматриваемая технология может использоваться для производства консервов из гидробионтов Атлантического и Тихого океанов [2].

Рассмотрим основные технологические операции производства консервов с точки зрения повышения безопасности и уменьшения расхода ресурсов.

На береговых рыбообрабатывающих комбинатах консервы в основном производят из предварительно замороженного сырья. Процесс размораживания в настоящее время осуществляется методом орошения водой замороженных блоков. При этом вода, стекающая с блоков попадает в ванну. Эта загрязненная вода используется для орошения следующих блоков, тем самым снижая качество получаемого сырья. Метод размораживания этим способом занимает достаточно продолжительное время, что ограничивает производительность линии. При оросительном размораживании температура рыбы на выходе дефростера изменяется в достаточно широких пределах от 2 – 16 °С. Разность температур размораживаемой рыбы приводит к перерасходу воды, энергии и снижению качества сырья.

Интенсифицировать процесс дефростации можно применением электрического тока, пропускаемого через блоки замороженной рыбы [3]. Экспериментально доказано, что такой подход сокращает время дефростации в 10-15 раз, при одновременном повышении качества продукции. Технически этот метод размораживания состоит в том, что брикет мороженной рыбы 1 с двумя перфорированными электродами 2 и изоляционными прокладками 3 помещают в ванну 4 (рис. 1).

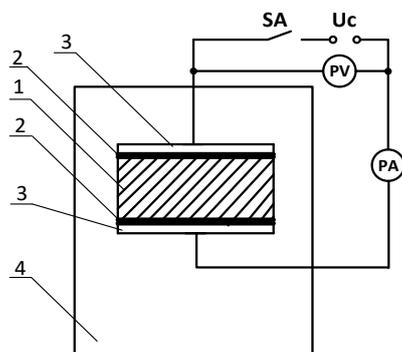


Рис. 1. Схема электроконтактного размораживания брикетов мороженной рыбы:

1 – брикет мороженной рыбы; 2 – перфорированный электрод; 3 – изоляционная прокладка; 4 – ванна

Электрический ток, проходя через продукт, размораживает его. Качество продукции повышается, потому, что исключается контакт с водой, получаемой при размораживании предыдущих брикетов рыбы.

Удельное электрическое сопротивление мышечной ткани рыбы в значительной степени зависит от температуры. При температуре 0 °С и токе промышленной частоты 50Гц оно составляет 8 Ом·м, а при температуре 30°С его значение достигает

2,5·10⁵ Ом·м. Система управления должна обеспечивать постоянный энергоподвод при резком изменении сопротивления блока замороженной рыбы, т.е. управлять напряжением необходимо таким образом, чтобы обеспечить с одной стороны достаточно быстрый прогрев рыбы, а с другой не допустить местного проваривания рыбы [3, 4].

Экономическая целесообразность использования указанного способа размораживания заключается в том, что улучшается качество продукта по сравнению с оросительным размораживанием, одновременно уменьшается требуемая производственная площадь помещения для размещения технологического оборудования электроконтактного размораживания, при этом освободившуюся площадь можно использовать для других производственных целей.

Для уменьшения бактериального загрязнения технологического оборудования консервной линии и продукт облучают световым потоком, обеспечивающим разрушение сложных молекул на более простые. Образующиеся более легкие молекулы испаряются, и тем самым повышается безопасность продукта из имеющегося сырья.

Действие световых волн в ультрафиолетовом диапазоне на внешние (валентные) электроны в атомах вызывает фотохимические реакции. Образующиеся в результате фотодиссоциации молекулы испаряются. Указанный эффект используется для очистки поверхностей от загрязнений.

Безопасность рыбных консервов достигается тщательным контролем и облучением используемого сырья, тары и рабочих органов световым потоком частотой 230...300 нм в ходе каждой технологической операции. Ультрафиолетовое излучение указанного диапазона частоты приводит к разрушению сложных молекул с последующим испарением их остатков. Экспериментально подтверждена зависимость относительной бактерицидной чувствительности от длины волны светового излучения рис. 2 [5, 6].

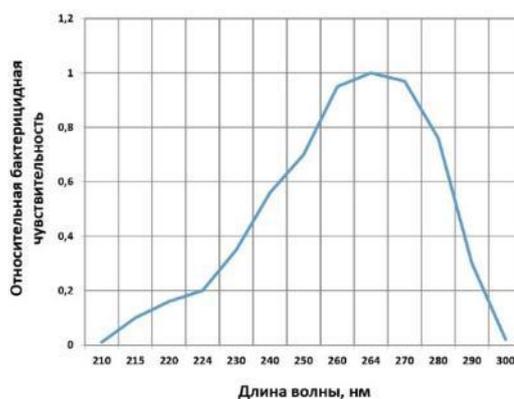


Рис. 2. Кривая бактерицидного воздействия ультрафиолетового излучения

Основной эффект обеспечения безопасности продукта достигается в процессе предварительной тепловой обработки (бланширования) и стерилизации, выполняемыми в соответствии с технологическим регламентом. Облучение световым потоком сырья и оборудования проводится на всех

технологических операциях, включая бланширование.

Важнейшим фактором сохранности консервов является герметичность консервной тары. Перспективным способом контроля герметичности является автоматизированный бесконтактный способ контроля с использованием средств технического зрения, применимый и к поточным непрерывным производствам [7, 8].

Применение средств технического зрения позволяет существенно изменить технологию закатывания и контроля качества закаточных швов. Функциональная структура системы контроля герметичности консервов с использованием системы технического зрения приведена на рис. 3.

В рыбной промышленности при производстве консервов велик удельный вес вспомогательных операций, таких как загрузка и дозирование сырья, выгрузка продукта и его расфасовка, затаривание. Для автоматизации подобных операций используются манипуляторы, автооператоры, промышленные роботы и робототехнические комплексы.

При использовании роботов в рыбной промышленности необходимо учитывать ее особенности и специфику поступления сырья «навалом», некомфортные условия для работы



Рис. 3. Функциональная структура системы контроля герметичности консервов с использованием системы технического зрения

(повышенная влажность, необходимость санитарной обработки оборудования). Сырье, полуфабрикаты и готовая продукция имеют низкую прочность, разнообразную и сложную геометрическую форму.

Основными показателями, которыми руководствуются при выборе манипулятора на рыбоконсервных линиях являются его номинальная грузоподъемность, зона обслуживания и погрешность позиционирования.

Перспективным направлением является внедрение в технологических операциях производства рыбных консервов роботов третьего поколения, снабженных системами искусственного интеллекта (интеллектуальных роботов).

При складировании консервной продукции необходимо обеспечивать постоянно температурного режима хранения продукта.

Современное состояние технологии, оборудования, теории управления и технических средств автоматизации позволяет переходить от

локальной к комплексной автоматизации консервных линий рыбообработывающих производств.

Адаптивность, многоуровневость, децентрализация управления на низших уровнях, оптимальный выбор технических средств для каждого уровня, единая информационная система при обеспечении повышенной безопасности производства консервов - необходимые компоненты современных систем комплексной автоматизации консервного производства повышенной безопасности.

Метрологическое обеспечение рыбообработывающих производств необходимо улучшить за счет оснащения технологических процессов общепромышленными и специализированными средствами измерений, созданными в различных отраслях пищевой промышленности.

Совершенствуются специализированные средства измерений температуры в теле рыбы до и после дефростации, в процессе ее тепловой обработки, кислотности масла, герметичности консервов и числа банок в потоке.

Расширяются возможности автоматизации рыбообработывающих производств при применении отечественных и зарубежных приборов, основанных на использовании излучений в ультразвуковом, инфракрасном и микроволновом диапазонах.

Современная концепция функционирования систем комплексной автоматизации консервного производства базируется на использовании программируемых логических контроллеров в управлении технологическим оборудованием линий. С использованием микропроцессорной техники в нашей стране и за рубежом разрабатывается тепловое оборудование высокой эффективности, которое возможно быстро перенастроить на выполнение различных технологических операций. Точность и быстродействие микропроцессорных средств измерений способствует совершенствованию технологических линий рыбообработывающих производств.

Новая информационная технология принятия управленческих решений основана на использовании автоматизированного рабочего места (АРМ), представляющего собой программно-технический комплекс, вынесенный на рабочее место оператора. Использование АРМ позволяет осуществить учет трудно формализуемых факторов, наличие которых характерно для производства рыбных консервов повышенной безопасности.

Перспективы использования вычислительной техники для решения производственных задач существенно расширяются в связи с переходом к использованию экспертных систем для принятия технических решений, использующих не только базы данных, но и базы знаний для совершенствования процессов стерилизации и других задач консервного производства.

Прогресс в области современных вычислительных средств делает реальным практическое применение экспертных систем в производстве. Такие системы могут, например, использоваться для диагностирования состояния технологического оборудования и средств автоматизации, выбора рационального режима обработки сырья и решения задач оперативного

управления. Возможности использования средств вычислительной техники для автоматизации производственных процессов расширяются с внедрением устройств речевого ввода и вывода информации [9].

Управление консервной линией будем рассматривать как модель самоорганизующейся системы. Такие системы обладают рядом особых свойств, включая неравновесность состояний. Модель устойчивости такой системы можно представить в виде «лестницы». Внешнее воздействие может способствовать перемещению системы на более высокий уровень, либо снизить ее на более низкий (рис.4). Развивающиеся системы используют свою энергию для обеспечения неравновесного состояния, т. е. либо для увеличения производительности линии или уменьшения ее при сохранении высокого качества консервов. Колебания производительности линии могут быть вызваны изменениями подачи сырья для производства консервов.

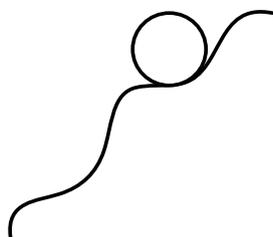


Рис. 4. Условная модель устойчивости

Заключение

В процессе работы над статьей авторы выделили и обосновали мероприятия по совершенствованию технологического процесса производства рыбных консервов повышенной безопасности. В частности, рекомендовано отказаться от размораживания блоков рыбы орошением водой, а размораживание проводить электрическим током, пропускаемым через блок рыбы. Такой подход позволит резко сократить время технологической операции и улучшить качество размороженного сырья.

Предложен и реализован автоматизированный бесконтактный способ контроля герметичности консервов с использованием средств технического зрения.

Повышение безопасности сырья и сохранности консервов значительно улучшится снижением бактериального загрязнения технологического оборудования, тары и сырья за счет освещения ультрафиолетовыми лучами с частотой 250+30-20 нм.

Сокращение ручного труда достигается использованием промышленных роботов, робототехнических систем и искусственного интеллекта. Для диагностирования состояния технологического оборудования, выбора рационального режима поступления сырья и решения задач оперативного управления рыбоконсервным производством рекомендуется использовать экспертные системы и вычислительные устройства с речевым вводом и выводом необходимой информации.

Литература

1. Маслова, Г.В. Рыбные консервы: проблемы качества и безопасности. Москва: Рыбпром. - №1,- 2010.- С.16-17.
2. Артюхова, С.А., Богданов В.Д., Дацун В.М. Технология продуктов из гидробионтов. М.: Колос, 2001. – 496 с.
3. Мезенова О.Я. Физические методы обработки гидробионтов. Монография. - Калининград: Издательство ФГОУ ВПО «КГТУ», 2010, 255 с.
4. Стефановский В.М. Размораживание рыбы. – М.: Агропромиздат, 1987. - 190 с.
5. Микаева С.А., Петренко Ю.П. Экспериментальные исследования генерации ультрафиолетового излучения. Учебный эксперимент в образовании. 2010. № 4. С. 82-88.
6. Костюченко С. В., Ткачев А. А., Фроликова Т. Н. УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности. Эпидемиология и Вакцинопрофилактика. 2020; 19 (5): С.112–119.
7. Долгий Н.А., Сердобинцев С.П. Автоматизированная система контроля герметичности консервов. Автоматизация и современные технологии. Ежемесячный межотраслевой научно-технический журнал, Москва, Изд. Машиностроение, №1, 2011г., С.14 – 16.
8. Патент 2396529 Российской Федерация, МПК G01M3/00. Способ контроля герметичности металлических банок с пищевыми продуктами и устройство для его осуществления. Н.А. Долгий, С.П. Сердобинцев; заяв. 27.07.2009; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22. – 8 с.
9. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов. Под. ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004 – 616с.

References

1. Maslova, G.V. Rybnye konservy: problemy kachestva i bezopasnosti [Canned fish: quality and safety issues]. Moskva: Rybprom. - №1,- 2010.- S.16-17.
2. Artjuhova, S.A., Bogdanov V.D., Dacun V.M. Tehnologija produktov iz gidrobiontov [Technology of hydrobiont products]. M.: Kolos, 2001. – 496 s.
3. Mezenova O.Ja. Fizicheskie metody obrabotki gidrobiontov [Physical methods of hydrobiont processing]. Monografija. - Kaliningrad: Izdatel'stvo FGOU VPO «KGTU», 2010, 255 s.
4. Stefanovskij V.M. Razmorazhivanie ryby [Fish defrosting]. – M.: Agropromizdat, 1987. - 190 s.
5. Micaeva S.A., Petrenko Ju.P. Jeksperimental'nye issledovanija generacii ul'traioletovogo izluchenija [Experimental studies of ultraviolet radiation generation]. Uchebnyj jeksperiment v obrazovanii. 2010. № 4. S. 82-88.
6. Kostjuchenko S. V., Tkachev A. A., Frolikova T. N. UF-tehnologii dlja obezzarazhivaniija vody, vozduha i poverhnostej: principy i vozmozhnosti [UV-Technologies for Disinfection of Water, Air and Surfaces: Principles and Possibilities]. Jepidemiologija i Vakcinoprofilaktika. 2020; 19 (5): С.112–119.

7. Dolgij N.A., Serdobincev S.P. Avtomatizirovannaja sistema kontrolja germetichnosti konservov [Automatic control system of the tinned food leak tightness]. Avtomatizacija i sovremennye tehnologii. Ezhemesjachnyj mezhotraslevoj nauchno-tehnicheskij zhurnal, Moskva, Izd. Mashinostroenie, №1, 2011g., S.14 – 16.
8. Patent 2396529 Rossijskaja Federacija, MPK G01M3/00. Sposob kontrolja germetichnosti metallicheskih banok s pishhevymi produktami i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Method for monitoring the tightness of metal cans with food products and a device for its implementation]. N.A. Dolgij, S.P. Serdobincev; zajav. 27.07.2009; opubl. 10.08.2010, Bjul. № 22. – 8 s.
9. Sistemnyj analiz i prinjatje reshenij [System analysis and decision making]: Slovar'-spravochnik: Ucheb. posobie dlja vuzov. Pod. red. V.N. Volkovoj, V.N. Kozlova. – M.: Vyssh. shk., 2004 – 616s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Павлович Сердобинцев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: serdob@klgtu.ru

Наталья Сергеевна Будченко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: natalya.budchenko@klgtu.ru

Николай Алексеевич Долгий, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: dolgi@klgtu.ru

Stanislav P. Serdobintsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Production Automation, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: serdob@klgtu.ru

Natalia S. Budchenko, Ph. D. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Production Automation, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: natalya.budchenko@klgtu.ru

Nikolay D. Dolgiy, Ph. D. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Production Automation, Kaliningrad State Technical University, 1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: dolgi@klgtu.ru

УДК 639.3.043

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.076

Методика расчета агрегированной величины совокупных рисков в работе рыбопромыслового флота

С.С. Мойсеенко¹, А.В. Грунтов¹¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота «КГТУ»

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы оценки рисков в работе рыбопромыслового флота. Определен состав основных технических и технологических рисков, а также рискообразующих факторов и причин, оказывающих негативное влияние на работу рыбопромыслового флота. Так, в число рискообразующих факторов входят: природные (штормы, ураганы, цунами, низкие температуры), техническое состояние судов, уровень технического оснащения рыболовных судов рыбопоисковой аппаратурой и спутниковыми системами и др. Риски в деятельности рыбопромыслового флота в основном взаимосвязаны. В этой связи при количественной оценке агрегированной величины всех рисков в работе рыболовного флота необходимо учитывать уровень взаимозависимости рисков и их коэффициент корреляции. Предложена методика расчета агрегированной оценки совокупного риска в работе рыбопромыслового флота. Приводится демонстрационный числовой пример практической реализации методики. Отмечается необходимость создания компьютерной программы реализации методики, что позволит выполнять весь комплекс расчетов агрегированных оценок совокупных рисков и эффективности мероприятий по снижению уровня рисков, а также цены риска.

Ключевые слова: факторы риска, экспертные оценки, цена риска, агрегированные оценки совокупного риска, эффективность мероприятий.

Calculation procedure of the aggregated value of total risks in the work of the fishing fleet

Sergey S. Moiseenko¹, Aleksandr V. Gruntov¹¹Academy of Fishing Fleet "KSTU"

Abstract. The article discusses topical issues of risk assessment in the work of the fishing fleet. The composition of the main technical and technological risks, as well as risk-forming factors and causes, which have a negative impact on the operation of the fishing fleet, has been determined. So, the facts include: natural (storms, hurricanes, tsunamis, low temperatures), the technical condition of ships, the level of technical equipment of fishing vessels with fish-finding equipment and satellite systems. The risks in the activities of the fishing fleet are mainly interrelated. In this regard, when quantifying the aggregate value of all risks in the operation of the fishing fleet, it is necessary to take into account the level of interdependence of risks and their correlation coefficient. A method for calculating the aggregate assessment of the total risk in the operation of the fishing fleet is proposed. A demo numerical example of the practical implementation of the technique is given. The need to create a computer program for the implementation of the methodology is noted, which will allow performing the whole complex of calculations of aggregated assessments of total risks and the effectiveness of measures to reduce the level of risks, as well as the price of risk.

Key words: risk factors, expert estimates, price of risk, aggregate estimates of total risk, effectiveness of measures.

Введение

Многообразие факторов, влияющих на работу рыбопромыслового флота, определяет необходимость их определения и анализа их природы, причинно-следственных связей, что в итоге позволяет выделить/идентифицировать факторы риска [1; 2; 3; 5]. Среди факторов риска можно выделить факторы, не оказывающие существенное влияние на работу флота и факторы оказывающие негативное влияние, т.е. факторы, порождающие риски причинения существенного ущерба (например, гибель судна, потеря орудий лова, выход из строя главного двигателя и судовых устройств и т. д.).

Управление рисками – это, прежде всего анализ факторов, влияющих на работу судна/флота, идентификация рисков и их оценка (количественная и/или качественная), принятие адекватных мер по снижению/устранению рисков. В этой связи актуальной является задача расчета корреляции рисков и агрегированной величины совокупных рисков (AR).

1. Методика расчета агрегированной величины совокупных рисков

1.1. Состав возможных факторов, влияющих на работу рыбопромыслового флота (РФ) включает рискообразующие факторы и причины, негативно влияющие на работу судов. Например, в состав таких факторов включают следующие: 1) природные – штормы и ураганы, цунами, низкие температуры, вызывающие обледенение и др.; 2) техническое состояние судов и оборудования; 3) уровень технического оснащения рыболовных судов рыбопоисковой аппаратурой и спутниковыми системами; 4) обеспечение судна техническим снабжением и другими запасами, необходимыми для выполнения рейса; 5) квалификация персонала; 6) транспортное обслуживание рыболовных судов на промысле; 7) нападение пиратов. Эти факторы можно объединить в две основные группы: 1-я группа – факторы, влияющие на I-й и j-й виды рисков работы рыбопромыслового флота; 2-я группа – факторы, оказывающие негативное влияние на процессы работы рыбопромыслового флота.

К i-му виду рисков относим технические риски, а к j-му виду – технологические. К техническим рискам относим: 1) выход из строя рулевого устройства; 2) выход из строя главного двигателя; 3) обесточивание судна вследствие отказа дизель-генераторов; 4) выход из строя рыбопоисковой аппаратуры и технологических линий и др. К технологическим рискам отнесем: 1) ошибки судоводителя по оценке параметров рыбного косяка; 2) ошибки при подготовке и настройке трала; 3) ошибки маневрирования с орудиями лова; 4) повреждение трала вследствие зацепа за грунт; 5) потеря трала/орудий лова; 6) столкновение промысловых судов в процессе траления; 7) сцепление орудий лова; 8) порча улова вследствие нарушения технологии обработки уловов.

Далее рассмотрим количество и взаимосвязи факторов, влияющих на риски i-го и j-го вида (см. табл. 1).

Таблица 1
Взаимосвязь факторов, влияющих на работу флота и рисков

Рискообразующие факторы, негативного характера	Технические риски i-го вида	Технологические риски j-го вида
Природные	x	x
Техническое состояние судов	x	x
Уровень Технического оснащения судов	x	x
Обеспечение снабжением на рейс	x	x
Квалификация персонала	x	x
Транспортное обслуживание флота на промысле	x	x
Пираты	x	x
Порча улова	-	x
Итого связей влияния	7	8

1.2. Расчет агрегированной величины совокупных рисков

Риски в деятельности рыбопромыслового флота в основном взаимосвязаны. В этой связи при количественной оценке агрегированной величины всех рисков в работе рыболовного флота необходимо учитывать уровень взаимозависимости рисков и их коэффициент корреляции. В упрощенном виде эта корреляция может быть оценена долей интегральных рискообразующих факторов в общем количестве выявленных факторов, влияющих на работу флота [4; 6]. Формула для расчета коэффициента парной корреляции имеет вид [6]:

$$k_{ij} = \frac{IF_i + IF_j}{(NF_i + IF_i) + (NF_j + IF_j)}, \quad (1)$$

где k_{ij} – коэффициент парной корреляции рисков (для $i \neq j$);

IF_i – количество факторов риска интегрального характера, влияющих на i-й риск в работе рыбопромыслового флота;

IF_j – количество факторов риска интегрального характера, влияющих на j-й риск;

NF_i, NF_j – количество факторов, оказывающих негативное влияние на i-й, j-й риски в работе рыбопромыслового флота.

При значимом уровне связи ($0,25 \leq k_{ij} \leq 0,75$) [6], агрегированная величина совокупных рисков [6] рассчитывается по формуле

$$AP = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N k_{ij} R_i R_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N k_{ij} (p_i \cdot U_i) (p_j \cdot U_j)}, \quad (2)$$

где R_i и R_j – цена i-го и j-го рисков в работе рыболовного флота;

p_i и p_j – соответственно вероятности проявления i-го и j-го рисков в работе флота;

U_i и U_j – возможный ущерб от проявления i-го и j-го рисков в работе флота.

Под величиной ущерба в случае наступления рискового события/риска нами рассматривается стоимость устранения последствий ущерба или сумма упущенной выгоды. Например, в результате прошедшего урагана судно лишилось спасательного бота/шлюпки и сорвана часть фальшборта на главной палубе, кроме того, судно доставило груз с опозданием на трое суток. В итоге сумма ущерба будет включать стоимость спасательного бота и стоимость потерь вследствие опоздания с доставкой груза.

2. Числовой пример расчета агрегированного совокупного риска

Рассматриваются два вида рисков – риски i-го и j-го видов. К рискам i-го вида относим технические, а к рискам j-го вида – технологические. В нашем случае под технологическими рисками мы понимаем риски технологических процессов добычи рыбы и морепродуктов, а также технологию обработки уловов. Эффект управления рисками можно оценить величиной снижения агрегированной величины совокупных рисков и величиной снижения цены риска [5; 8]. Такой подход к оценке мероприятий по снижению уровня рисков работы рыболовного флота наиболее продуктивный.

На основе приведенных данных (табл. 1) рассчитаем по формуле 1 коэффициент корреляции между рисками i-го и j-го видов:

$$k_{ij} = (4+8) / [(7+4) + (7+8)] = 12/26 = 0,46.$$

Поскольку уровень взаимосвязи значим ($0,25 \leq k_{ij} \leq 0,75$), то агрегированная величина совокупных рисков может рассчитываться по формуле (2). Для того, чтобы рассчитать агрегированную величина совокупных рисков, необходимо рассчитать количественные оценки i-го и j-го видов рисков. Поскольку чаще статистических данных для расчета оценок нет, то воспользуемся методом экспертных оценок [5]. В процессе работы рыболовных судов возможно появление трех основных независимых событий, появление которых может стать причиной

возникновения аварийных ситуаций следующего характера: первое (A_1) – отказ гидроакустической станции; второе (A_2) – отказ рулевого управления; третье (A_3) – отказ траловой лебедки. Вероятностная оценка возникновения i -го/ j -го вида риска (технического/технологического риска) рассчитывается в следующей последовательности:

1. Расчет экспертных оценок вероятности появления событий [5] – (A_1); (A_2); (A_3) по формуле (3)

$$P_i^{ож} = (P_i^{min} + 4P_i^{HB} + P_i^{max}) / 6, \quad (3)$$

где $P_i^{ож}$ – априорная вероятность ожидания i -го отказа; P_i^{min} – минимальное значение вероятности;

P_i^{HB} – наиболее вероятная величина вероятности; P_i^{max} – максимальное значение вероятности.

P_i^{HB} рассчитывается по формуле (4), а g – по формуле (5):

$$P_i^{HB} = (2P_i^{min} + P_i^{max}) / 3, \quad (4)$$

$$g^2 = [(P_i^{max} - P_i^{min}) / 6]^2 \quad (5)$$

Положим в результате расчетов были определены априорные вероятности появления событий – $P(A_1)$; $P(A_2)$; $P(A_3)$, которые равны соответственно: 0,007; 0,01; 0,015.

2. Расчет вероятности появления j -го вида риска (технологического). Рассматриваются три независимых события, которые могут стать причиной аварии: B_1 – ошибки судоводителя по оценке ситуации; B_2 – ошибки настройки трала; B_3 – отказ гидроакустической станции. Положим, в результате расчетов были определены априорные вероятности появления событий – $P(B_1)$; $P(B_2)$; $P(B_3)$, которые равны соответственно: 0,009; 0,01; 0,018.

3. Рассчитывается агрегированная величина совокупного риска (AP) по формуле (2). Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные для расчета агрегированной величины совокупных рисков

№ п/п	P_i P_j	U_i U_j, ye	$P_i U_i$ $P_j U_j, \text{ye}$
1	0,007	10000	70
2	0,01	50000	500
3	0,015	100000	1500
1	0,009	18000	1620
2	0,01	12000	120
3	0,018	25000	450

В результате вычислений по формуле (2) находим значение агрегированной величины совокупного риска равное $AP = 1444,1 \text{ ye}$. В примере мы ограничились расчетом AP для трех рисков из каждого вида (i, j), но в реальных условиях придется принимать к расчету большее число рискообразующих факторов, что объективирует создание специальных компьютерных программ для расчета локальных рисков и агрегированных величин совокупного риска, а также для оценки мероприятий по снижению уровня рисков.

Заключение

Рассмотренный подход агрегированной величины совокупных рисков расширяет возможности оценки многообразия факторов риска в деятельности рыбопромыслового флота. Для внедрения этого подхода в практику управления рисками необходимо создание специальных компьютерных программ, что позволит решать задачи оценки совокупных рисков большой размерности. Расчет прогностических оценок риска позволяет на раннем этапе разработать упреждающие организационно-технические мероприятия, направленные на снижение уровня риска, что позволит повысить уровень безопасности мореплавания и ведения промысла рыболовными судами.

Литература

1. Абчук В.А. Теория риска в морской практике / В.А. Абчук – Л.: Судостроение, 1983. – 152 с.
2. Александров М.Н. Безопасность человека на море / М.Н. Александров. – Л.: Судостроение, 1983. – 204 с.
3. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1989. – 364 с.
5. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Управление рисками в мореплавании и промышленном рыболовстве: учебное пособие / С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. – М.: Моркнига, 2017. – 385 с.
6. Методы и модели агрегированной оценки совокупного риска. Электронный ресурс: moluch.ru/conf/econ/archive/263/13257/ (дата обращения 02.07.20).
7. Методы оценки риска. Электронный ресурс: studme.org/41430/logistika/metody_otsenki_riska (дата обращения 02.07.20).
8. Управление совокупным риском. Электронный ресурс: www.finagood.ru/fgos-795-1.html (дата обращения 02.07.20).

References

1. Abchuk V.A. Risk theory in marine practice / V.A. Abchuk – L.: Shipbuilding, 1983. – 152 p.
2. Alexandrov M.N. Human safety at sea / M.N. Alexandrov. – L.: Sudostroyenie, 1983. – 204 p.
3. Akimov V.A., Lesnykh V.V., Radaev N.N. Basics of risk analysis and management in natural and technogenic spheres. – M.: Business Express, 2004. – 352 p.
4. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Probability theory and its engineering applications. – M.: Nauka, 1989. – 364 p.

5. Moiseenko S.S., Meiler L.E. Risk management in navigation and industrial fishing: a tutorial / S.S. Moiseenko, L.E. Mailer. – М.: Morkniga, 2017. – 385 p.
6. Methods and models for aggregate risk assessment. Electronic resource: moluch.ru/conf/econ/archive/263/13257/ (date of treatment 07/02/20).
7. Methods of risk assessment. Electronic resource: studme.org/41430/logistika/metody_otsenki_riska (date of treatment 07/02/20).
8. Management of aggregate risk. Electronic resource: www.finagood.ru/fgos-795-1.html (date of treatment 07/02/20).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Сергеевич Мойсеенко, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры организации перевозок, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота «КГТУ», 236035, Калининград, ул. Молодёжная, д. 6, e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

Sergej S. Moiseenko, Dr. Sci. (Edu), Ph.D. (Eng), Professor, Professor of the Department of Organization of Transportation, Baltic State Academy of Fishing Fleet "KSTU", St. Youth, d. 6, Kaliningrad, 236035, Russian Federation, e-mail: moiseenkoss@rambler.

Александр Владимирович Грунтов, начальник Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота «КГТУ», 236035, Калининград, ул. Молодёжная, д. 6, e-mail: apv@bga.gazinter.net

Aleksandr V. Gruntov, Head of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet, Baltic State Academy of Fishing Fleet "KSTU", St. Youth, d. 6, Kaliningrad, 236035, Russian Federation, e-mail: apv@bga.gazinter.net

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 377.022

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.077

Экосистема рыбной отрасли в цифровой экономике

А.Я. Яфасов¹, А.А. Меркулов¹, Р.К. Поляков¹, Ф.Г. Майтаков¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Проведен сопоставительный анализ стратегий развития морской деятельности до 2030 года, судостроительной промышленности до 2035 года и рыбохозяйственного комплекса до 2030 года, свидетельствующие о необходимости стратегических перемен в этих секторах экономики России. Целью работы является условия формирования отраслевой государственно-частной экосистемы на примере рыбохозяйственного комплекса России для перехода от экстенсивного к интенсивному развитию. Рассмотрены ключевые факторы развития рыбной отрасли, связанные с продовольственной безопасностью страны: формирование государственно-частной экосистемы, синхронизированное обновление рыболовного флота и производственной базы на основе развития новых технологий, цифровизация производственных и управленческих процессов, непрерывное повышение знаний и компетенций работников отрасли. Показано, что каждый из перечисленных факторов не достаточен для достижения стратегических целей, но одновременная их реализация обеспечивает запуск волновых процессов, способных поднять рыбную отрасль на новый уровень развития. Государственно-частные экосистемы на уровне порта, региона, отрасли строятся по принципу «матрешки». Выделение рыболовного судостроения в самостоятельный сектор гражданского судостроения, углубление переработки сырья и оптимизация распространения готовой продукции с использованием экосистемного подхода позволят заполнить пробел в морской экономике - обеспечить системное пространственно-производственное планирование, создания в концепте «Морская акватория – Приморская территория» сетей бизнес - единиц, объединенных в экосистемы единой целью рациональной добычи, безотходной переработки и доставки потребителю высококачественной продукции на основе водных биологических ресурсов с минимальными транзакционными издержками.

Ключевые слова: экосистема, стратегия развития, морская экономика, рыбохозяйственный комплекс, кластеры, пространственное планирование, рыболовное судостроение, цифровые технологии, ситуационный центр

Ecosystem of the fishing industry in the digital economy

Abdurashid Y. Yafasov¹, Aleksandr A. Merkulov¹, Ruslan K. Polyakov¹, Fedor G. Maitakov¹¹Kaliningrad state technical university, Russian Federation

Abstract. A comparative analysis of the strategies for the development of maritime activities until 2030, the shipbuilding industry until 2035 and the fishery complex until 2030 has been carried out, indicating the need for strategic changes in these sectors of the Russian economy. The aim of the work is the conditions for the formation of a sectoral public-private ecosystem on the example of the fishery complex of Russia for the transition from extensive to intensive development. The key factors in the development of the fishing industry related to the country's food security have been considered: formation of a public-private ecosystem, synchronized renewal of the fishing fleet and production capacities based on the development of new technologies, digitalization of production and management processes, continuous improvement of knowledge and competencies of industry workers. It is shown that each of the above factors is not sufficient to achieve strategic goals, but their simultaneous implementation ensures the launch of wave processes that can take the fish industry to a new level of development. Public-private ecosystems at the level of the port, region, industry are built on the principle of "nesting dolls". Allocation of fishing shipbuilding into an independent sector of civil shipbuilding, deepening the processing of raw materials and optimizing distribution of finished products using the ecosystem approach will fill the gap in the maritime economy - to provide systematic spatial and production planning, create networks of business units in the concept "Sea area - Primorskaya territory", united in ecosystems with a single goal of rational extraction, waste-free processing and delivery of high-quality products to consumers based on aquatic biological resources with minimal transaction costs.

Keywords: ecosystem, development strategy, maritime economy, fishery complex, clusters, spatial planning, fishing shipbuilding, digital technologies, situational center

Введение

В течение 3-х месяцев, весьма короткий срок по меркам стратегического планирования, в России были приняты 3 ключевые стратегии развития национальной деятельности, связанной с работой в Мировом океане: Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года [1] (Стратегия МД-2030), Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года [2] (Стратегия ССП-2035) и Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года [3] (Стратегия

РХК-2030). Отсюда следует вывод: в национальном стратегически важном секторе экономики России – морском назрела необходимость стратегического анализа её состояния с разных точек зрения, формулирования новых целей и задач, вызванных необходимостью перемен и принятие стратегических решений по направлениям развития морской экономики России в условиях стремительного развития новых технологий и цифровой экономики. Целью работы является условия формирования отраслевой государственно-частной экосистемы на примере рыбохозяйственного комплекса России для перехода от экстенсивного к интенсивному развитию.

Для этого в работе рассмотрены ключевые факторы развития рыбной отрасли: формирование государственно-частной экосистемы, обновление рыболовного флота и производственной базы на основе развития новых технологий, цифровизация производственных и управленческих процессов, непрерывное повышение знаний и обновление компетенций работников отрасли. Реализация перечисленных факторов позволит запустить волновые инновационные процессы в РХК России, способные поднять рыбную отрасль на новый уровень развития со всеми преимуществами цифровой экономики.

Производство продукции из водных биологических ресурсов (ВБР), в первую очередь, - качественных продуктов питания: натуральных белков, жиров, биологически активных веществ (БАВ), минеральных соединений и микроэлементов является важным сектором морской экономики многих стран, а сам Мировой океан - ключом в будущее [4,5]. В данной работе проводится анализ перечисленных стратегий, связанных с работой в Мировом океане и рассматриваются концептуальные вопросы возрождения отечественной инженерии и судостроения для целей рыбной отрасли. Значительный интерес представляют вопросы перевода РХК на новую технологическую основу с применением новых знаний в области информационных технологий, искусственного интеллекта (ИИ), Интернета вещей (IoT), киберфизических систем и ситуативного управления [6,7]. Анализ достижений в развитии гражданского судостроения и судового оборудования, морских дронов, перерабатывающих производств судового и берегового базирования показывают перспективы ускоренного развития в случае диверсификации деятельности РХК и перевода его на платформенную экономику [8]. На основе проведенных исследований предлагается создание первой государственно-частной отраслевой экосистемы с реализацией которой открывается возможность перевода рыбной отрасли на принципиально новый уровень цифровой экономики с интенсификацией производства и оптимизацией распространения продукции. В работе не рассматривается морская деятельность, связанная с освоением минеральных энергетических и рудных ресурсов недр дна Океана, так как это отдельное крупное направление, в котором сложным образом переплетены политические и экономические проблемы многих стран, экологические - человечества в целом.

Актуальность проблемы вызвана несколькими причинами. Морская экономика является важной составляющей национальной экономики любой страны, имеющей выходы в Мировой океан, а рыбная отрасль - опорой её продовольственной безопасности. Доступ к морским ресурсам повышает адаптируемость приморских регионов к флуктуациям в национальной и региональной экономике, обязывает своевременно решать вопросы морской экологии, повышает устойчивость региональной приморской бизнес-среды за счет снижения рисков нехватки ресурсов, способствует росту потенциала приморских регионов, социальному развитию и повышению социальной стабильности. Примером является развитие свободных (особых) экономических зон, организованных в приморских

зонах многих стран. В сложной ситуации находится отечественное рыболовное судостроение. Оно является сегодня, как-бы, побочной линией судостроительных заводов на 90% загруженных, по данным Стратегии ССП-2035, военными заказами [2]. Для страны, имеющей протяженность береговой морской линии, сравнимой с длиной Экватора Земли, рыболовное судостроение должно стать одним из самостоятельных высокотехнологичных секторов гражданского судостроения. Для справедливости следует отметить, что половина береговой линии России приходится на моря Северного Ледовитого океана, на которых навигация и активная хозяйственная деятельность по добыче ВБР ограничена небольшим периодом. Но изменения климата на планете заставляет пересмотреть отношение к Арктике [9]. В этой связи, в рыболовстве, в строительстве рыболовных судов, считающемся одним из самых сложных направлений судостроения, появляются новые задачи расширения мореходных качеств судов для обеспечения морского промысла ВБР в северных широтах.

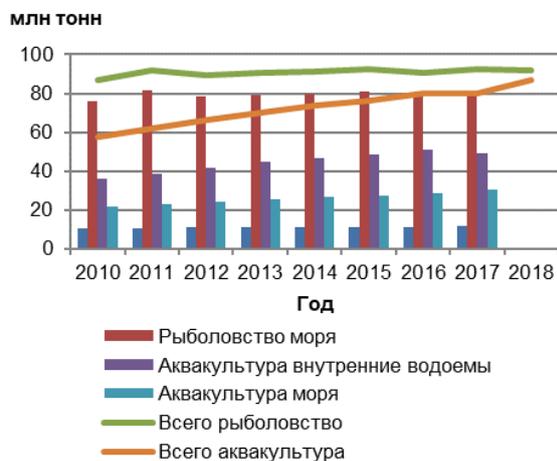
И, наконец, решение задачи оптимизации процесса добычи, транспортировки и переработки ВБР, поставки его потребителю в рыбной отрасли России сегодня не соответствует современным технологиям автоматизации, роботизации и информатизации производственных процессов, снижению ресурсоемкости и безопасности. В РХК не используются сетевые производственные системы на цифровых платформах, активно развивающиеся, например, в судостроении, автомобилестроении и ракетостроении [10-12], в производстве пищевой белковой продукции - искусственного мяса, рыбы и иных заменителей морепродукции из сырья растительного происхождения [13]. Отдельного рассмотрения требует слабое внимание Росрыболовства к диверсификации своей деятельности и выстраиванию системы профессионального образования во взаимосвязи с научными исследованиями и инновационной деятельностью, укрепления материально-технической базы отраслевых университетов в соответствии с запросами цифровой экономики.

1. Состояния рыбной отрасли в мире

Для оценки ситуации и позиционирования РХК России в мировом рыболовстве проведем краткий анализ состояния рыбной отрасли в мире с учетом наблюдающихся тенденций развития технологий добычи, транспортировки и переработки ВБР. По последним данным ФАО [14], опубликованным в 2020 году, общий объем вылова, включая моря и внутренние водоемы стран в 2018 году составил 91,8 млн тонн, аква- и марикультуры - 87 млн тонн, всего 178,8 млн тонн, рисунок 1.

Следует обратить внимание на важный момент: в последние пять лет, с 2014 по 2019 гг общий объем улова стабилизировался и составил $91,8 \pm 0,6$ млн тонн, в то время как общий объем аква- и марикультуры за тот же период вырос с 73,7 млн тонн до 87,0 млн тонн, с ежегодным приростом в 4,5%. То есть объемы мирового улова в водоемах подошли к своему пределу, ограниченному возможностями естественного воспроизводства ВБР, а расширение производства аквакультуры может продолжаться еще многие годы. Так как качество ВБР Океана

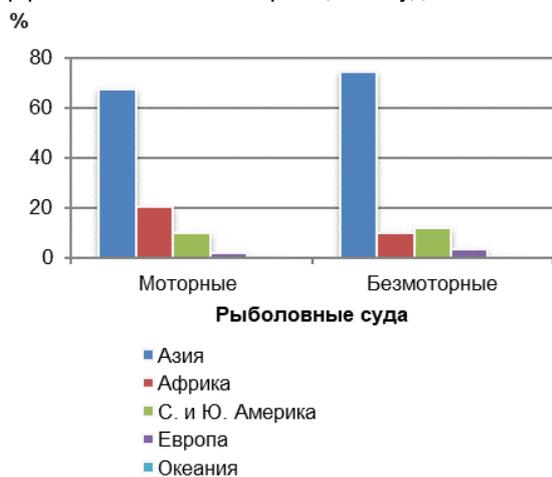
существенно выше качества продукции аквакультуры, следует вывод: переход рыбной отрасли России от экстенсивного к интенсивному развитию является безальтернативным и необходимо обратить внимание на качество вылова, вопросы углубленной переработки ВБР, рециклинг, на распределенное по всей территории России развитие аквакультуры.



Источник: графики построены авторами на основе данных ФАО [16].

Рис. 1. Общие объемы вылова, объемы вылова в морях и во внутренних водоемах стран в 2010-2018 гг

Численные характеристики мирового рыболовного флота по состоянию на 2018 год приведены на рисунках 2 и 3. Они имеют тенденцию к снижению при одновременном повышении эффективности новых строящихся судов.

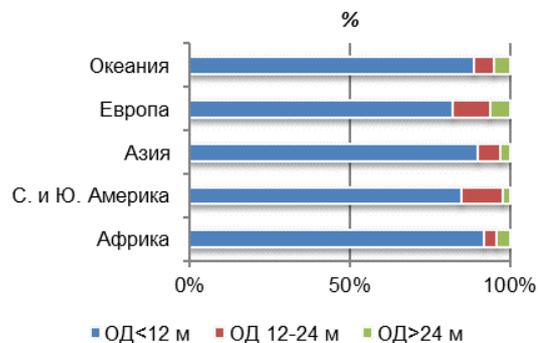


Источник: графики построены авторами на основе данных ФАО [16].

Рис. 2. Распределение моторных и общего числа безмоторных рыболовных судов по регионам по регионам, в %, 2018 год.

В частности, за период с 2013 по 2018 гг флот Китая сократился почти на 20% – с 1 071 000 до 864 000 судов. Это свидетельствует о развитии новых технологий в судостроении, замене устаревших моделей судов и повышении эффективности рыболовства. Флот Европы составляет чуть больше 2%, а флот Океании – менее 1% общемирового,

однако рыболовство остается для этих регионов важным видом деятельности. В 2018 году ок. 82% моторных рыболовных судов в мире, классифицированных по длине, имели общую длину менее 12 метров. Большинство из них - беспалубные. Такие суда преобладают в составе рыболовного флота всех стран и регионов.



Источник: графики построены авторами на основе данных ФАО [16].

Рис. 3. Распределение моторных рыболовных судов по размеру по регионам, в %, 2018 год.

Поведение основных игроков мирового рынка судостроения, включая стратегии конкурентной борьбы, а также информация об их конкурентных преимуществах и недостатках, уровне рентабельности, структуре и оборачиваемости активов, типовой структуре затрат и других характеристиках, характеризующих производителей может меняться в значительных пределах. Это зависит от политических решений, от меняющихся барьеров выхода на рынок, включая законодательные ограничения, ограничения доступа к ключевым ресурсам, ограничения по масштабу, от серии строящихся судов. Поэтому проведение корректного анализа рынка в части сравнения стоимостных характеристик тех или иных судов возможно в рамках подготовки конкретного контракта на проект. Создание отраслевой экосистемы РХК, управляемой из единого ситуационного центра (СЦ) позволит существенно повысить стойкость системы к воздействиям извне по морской аналогии: небольшие волнения крупному кораблю не помеха, а крупные волнения, переходящие в шторм, вычисляются заблаговременно предиктивной аналитикой с последующей оптимизацией принимаемого управленческого решения СЦ.

Новые технологические и цифровые решения рождают новые потребности в компетентных специалистах, подготовка и включение которых в новые производства создают предпосылки для генерации новых инженерных решений, делая тем самым процесс инноватики саморазвивающимся.

2. Новые технологии, цифровые платформы и экосистемы в рыбной отрасли

Рассматривая проблему организации устойчивой экосистемы рыбной отрасли в цифровой экономике следует подчеркнуть, что цифровизация отраслевых процессов сама по себе не даст ожидаемого результата, если оставаться в рамках старых технологий РХК. Образно говоря, бессистемная

цифровизация или/и цифровизация отсталых технологий, даст бессистемную цифровую картину тех самых морально устаревших и неэффективных по современным требованиям технологий. Поэтому цифровизация отрасли должна сопровождаться совершенствованием всей технологической цепочки, начиная от методов разведки и добычи ВБР и заканчивая контролируемые процессами перевалки и доставки улова для переработки и до конечного пункта - доставки продукции потребителю в свежем виде, т.е., новой концепцией дизайна добычи и переработки ВБР. Для рыбной отрасли России такая постановка является новой и не рассмотрена в Стратегии РХК-2030.

С учетом специфики продукции отрасли, заключающейся в высоких требованиях по свежести и качеству, пищевым характеристикам и пищевой безопасности продукции, а также основных тенденций развития технологий в рыболовстве, необходимы новые разработки в направлениях:

1. умные, селективные методы промысла SmartFish, включая лазерный трал, нацеленные на обеспечение воспроизводства устойчивых запасов, предотвращение приловов и минимизацию воздействия на окружающую морскую среду;

2. обеспечение по всей технологической цепочке, начиная с момента вылова, объективного контроля объемов вылова, условий хранения, транспортировки и переработки продукции, например, с помощью электронных этикеток, подключенных к GPS, формирующих сбор информации (T° , t , m , x , y) с последующим использованием больших данных (Big Data);

3. интеграция новых технологий в существующее оборудование, либо создание новых моделей оборудования с последующей интеграцией в существующие технологические цепочки, с переосмыслением в обоих случаях всего процесса добычи и переработки ВБР на новом уровне знаний и выработкой новых компетенций;

4. автоматизация процессов перемещения вылова с тралов в трюмы траулеров (транспортных, рыбоперерабатывающих судов) с помощью беспилотных морских дронов, затем из судов на береговые терминалы с координацией общей логистики из единого регионального центра управления – СЦ для сокращения транзакции и минимизации издержек;

5. создание ситуационных центров, обеспечивающих ситуативное управление с использованием Big Data, ИИ и AR/VR технологий и возможностью гибкого подключения смежных областей экономики с возможностью передачи структур данных и быстрой обработки информации.

Все перечисленные технологии, по сути, являются прорывными, так как имеет высокий потенциал для реализации и тиражирования, способны привести к значительному экономическому эффекту, возрастание цены продукции при этом компенсируется его высоким качеством и снижением отходов.

Экосистемы рыбной отрасли на цифровых платформах как на системах алгоритмизированных взаимовыгодных взаимоотношений независимых участников на уровне флотилии рыболовных судов, порта, региона или отрасли, выстроенные по принципу «матрешки», осуществляются в единой

информационной среде, снижая транзакционные издержки за счёт новой организации системы разделения труда и применения специализированных комплексов цифровых технологий. Рассматривая основные типы цифровых платформ в виде инструментальной, инфраструктурной и прикладной в контексте ГЧП, следует отметить, во-первых, желательность появления третьего участника взаимодействия – общественных (некоммерческих и неправительственных организаций) и, во-вторых, изменение весового соотношения участия государства и бизнеса в организации экосистем.

Инструментальная и прикладная ЦП финансируется бизнесом, а инфраструктурная – государством, бизнесом и общественными организациями. Участие общественных организаций следует признать необходимым по причине обеспечения общественного контроля за поставщиками информации и принятием решений на уровне хозяйствующего субъекта во избежание нарушений прав человека и общественных интересов хозяйствующих субъектов. Участие государства в инфраструктурной ЦП обеспечит ускоренный вывод на рынок IT-продукции и IT-сервисов, ускорение автоматизации хозяйствующих субъектов, доступ к источникам данных в экосистеме, для бизнеса участие в ЦП откроет возможности углубления переработки сырья, рециклинга и оптимизации распространения готовой продукции.

В целом развитие ЦП, экосистемы рыбной отрасли в рассмотренном виде позволит заполнить пробел в морской экономике - обеспечить организацию системного пространственно-производственного цифрового планирования и создания в концепте «Морская акватория – Приморская территория» сетей бизнес - единиц, объединенных в экосистемы единой целью рациональной добычи, безотходной переработки и доставки потребителю высококачественной продукции на основе ВБР с минимальными транзакционными издержками. Основой формирования экосистемы рыбной отрасли являются три стратегии: развития морской деятельности до 2030 года, судостроительной промышленности до 2035 года и рыбохозяйственного комплекса до 2030 года, отражающие необходимость стратегических перемен в этих секторах экономики России. С учетом состояния мировой рыбной отрасли и сформулированных актуальных проблем рыбной отрасли России проведем анализ принятых год назад трех ключевых стратегий развития национальной деятельности России в Мировом океане.

3. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года

Стратегия МД-2030 сформулирована с учетом Морской доктрины России и определяет 2 этапа реализации: 1 - до 2020 года включительно и 2- 2021-2030 гг, поэтому представляет интерес её рассмотрение с учетом результатов выполнения 1-этапа. В качестве основных проблем развития РХК Стратегия МД-2030 выделяет физическое и моральное старение отечественного рыбопромыслового флота, недостаточный объем его строительства и модернизации на отечественных

верфях, низкий уровень технологического оснащения рыбного промысла и развития инфраструктуры специализированных терминалов, слабый дистанционный контроль за промысловой деятельностью, большие экономические потери от незаконного оборота ВБР. Система образования выделена в виде проблем в развитии образования и кадрового обеспечения, констатирует недостаток квалифицированных кадров по морским специальностям и направлениям подготовки. Отмечается отсутствие оценки состояния кадрового потенциала и координации деятельности по его созданию, а также условий для сохранения и привлечения квалифицированных кадров в плавсостав и сферу управления морской деятельностью. Показан недостаточный уровень обеспеченности научными и педагогическими кадрами, развития лабораторной, учебно-тренажерной и методической базы образовательных организаций, внедрения инновационных технологий в образовательный процесс. Недостатком Стратегии МД-2030 в этой части является отсутствие важного тезиса: фундаментом успешного развития морской экономики является фундаментальная наука, инженерия, инноватика и построенная на их основе система конвергентного профессионального образования.

В Стратегии МД-2030 предлагается переход к планированию развития приморских территорий и прибрежных акваторий путем выделения их в отдельный единый объект государственного управления. На наш взгляд переход к комплексному планированию развития прибрежных акваторий и приморских территорий продуктивнее формулировать в ином виде – в концепте системно оформленной хозяйственной деятельности: «Морская акватория – Приморская территория» в виде систем - сетей бизнес-единиц, объединенных единой целью рациональной добычи, безотходной переработки и быстрой доставки потребителю высококачественной продукции на основе ВБР с минимальными транзакционными издержками. Причем в бизнес-единицы должны входить суда всех видов: рыболовные, рыбоперерабатывающие, рыботранспортные и т.д. Предлагаемый концепт, дополняя Стратегию МД-2030, переводит иерархическую систему государственного управления в сетевую систему производственной и социально-экономической деятельности, выстроенную на единой цифровой платформе с управлением из ситуационного центра (СЦ) [6, 15, 16]. Т.е. обеспечивается системный переход РХК в русло инновационного развития, от экстенсивного развития производства к интенсивному.

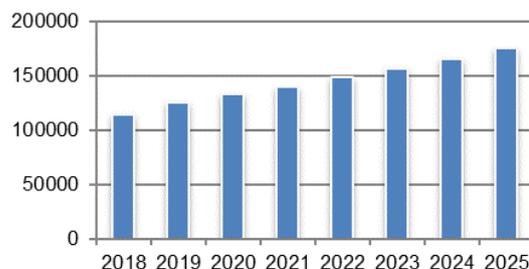
Новый подход к организации скоординированной совместной деятельности экономических акторов рыбной отрасли можно успешно реализовать в короткие сроки при условии синхронного развития рыболовного судостроения, машиностроения для переработки ВБР, создания сетей перерабатывающих производств и сбытовых организаций на единой цифровой платформе. В мировой практике отсутствует системное пространственное планирование и строительство сетей производственных предприятий и сферы услуг с использованием специализированных цифровых платформ и ситуационных центров (СЦ), способных

объединить всех акторов региональной экономики рыбной отрасли и предприятий, взаимодействующих с ними, в единую производственно-потребительскую сеть, координируемую и управляемую из одного центра.

СЦ исторически принято рассматривать как инструмент управления в критических или сложных ситуациях с непредсказуемым воздействием внешних сил либо внутренних процессов. Однако с нарастанием турбулентных процессов в социально-экономических системах и усложнением производственных процессов, связанных с производством сложной техники либо с участием большого количества соисполнителей, СЦ, обеспечивая непрерывную поддержку принятия решений в ситуативном управлении, становятся обычным инструментом организации и управления сетевого производства. Цифровая трансформация рыбной отрасли позволит организовать производственные системы, включающие морские суда по добыче ВБР, судовые минифабрики переработки ВБР, в том числе отходы – в режиме рециклинга и портовые производственные комплексы, включенные в единую систему – производственную и транспортно-логистическую сеть, координируемую единым, гибко перестраиваемым и непрерывно развивающимся, СЦ с помощью ИИ.

4. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года

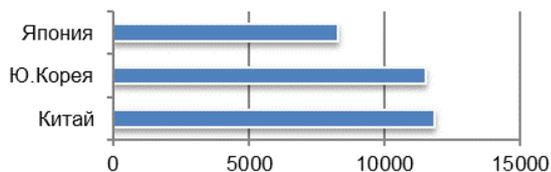
Современное состояние гражданского судостроения России и Стратегию ССП-2035 в части, касающейся судов для РХК рассмотрим с учетом общего состояния судостроения в мире. В мировом секторе гражданского судостроения наблюдается жесткая конкуренция, за последние 5 лет, с 2014 по 2019 год количество крупных верфей в мире сократилось почти вдвое. С учетом объединения св. 230 предприятий в результате процессов консолидации в судостроительной отрасли число действующих крупных верфей к 2019 году по всему миру составило 281. Причины в снижении спроса на новые суда, вызванные неопределенностью экологических норм в связи с изменениями климата, новыми перспективными составами топлива, а, следовательно, с конструкциями судовых двигателей и ряда связанного с ними судового оборудования. Объем мирового судостроительного рынка в 2018 году с прогнозом на 2019-2025 годы представлен на рисунке 4.



Источник: графики построены авторами на основе данных [statista.com](https://www.statista.com)

Рис. 4. Объем мирового судостроительного рынка в 2018 году с прогнозом на 2019-2025 годы, млн \$USA

В 2018 году объем мирового судостроительного рынка составил \$114,3 млрд с прогнозируемым объемом к 2025 году \$175 млрд при ежегодных средних темпах роста в 5,7 процента. На рисунке 5 представлены объемы судостроения в трех ведущих судостроительных странах мира – Китае, Южной Корее и Японии. Первое место по объемам завершения строительства судов в период с января по июнь 2019 года в мире занимает Китай с общим тоннажем 11,8 млн тн.



Источник: графики построены авторами на основе данных [statista.com](https://www.statista.com)

Рис. 5. Объемы строительства судов в крупнейших судостроительных странах со сроком завершения в первом полугодии 2019 года, в единицах регистровой вместимости тыс. GT

Характеризуя кратко судостроение в Европе можно отметить, что судостроительный и судоремонтный сегмент состоит примерно из 300 предприятий, из которых пятая часть крупные верфи, а остальное - малые и средние предприятия. С ними в тесном взаимодействии работают ок. 7500 компаний, производящие судовое и морское оборудование. Следует обратить внимание на эволюцию стратегии европейского судостроения. В стратегии «LeaderSHIP 2015», опубликованной в 2003 году, особое внимание уделялось конкурентоспособности, инновациям и специализации в определенных сегментах рынка судостроения. Стратегия LeaderSHIP 2020, представленная в 2013 году, нацеливает на создание энергоэффективных судов и морские исследования, направленные на достижение нулевого уровня выбросов. Примечательно, она, как и Стратегии МД-2030 и ССП-2035, расширяет круг субъектов судостроения, включая в него приморские регионы, но идет дальше, включая все морские технологические отрасли - ветроэнергетическую промышленность, дноуглубительные и др. работы, уделяя особое внимание умной специализации, «умным» продуктам и услугам.

В Стратегии ССП-2035 отмечается глубокое депрессивное состояние российского гражданского судостроения в последние 30 лет, до 2017 года. На это имелся ряд причин объективного и субъективного характера, связанные с политическими, экономическими, финансовыми, организационными, технологическими и иными проблемами, которые решала Россия после распада СССР. Реальные подвижки в рыболовном судостроении начались с 2015 - 2017 гг с актуализацией проблемы в докладе калининградских ученых на проектом комитете Маринет АСИ и получили существенный импульс в связи с изменением законодательства по условиям выделения квот на добычу ВБР по инвестиционным признакам. Эффективность этих мер сказалась на росте объема инвестиций в РХК - с 4,5 млрд. рублей в 2006 году до 23,9 млрд. рублей в 2018 году. Более

того, произошел сдвиг в позиционировании рыболовного судостроения. Генеральный директор ОСК А. Рахманов, отмечая рыболовное судостроение как одно из наиболее перспективных и сложных, проблемных направлений, сформулировал три ключевых направления стратегии ОСК:

- разработка и продвижение на рынок высокотехнологичной и наукоёмкой продукции;
- обеспечение лидирующих позиций судостроения на существующих рынках;
- формирование новых рынков и освоение новых направлений гражданского судостроения, в первую очередь – рыболовного, и обратил особое внимание на повышении эффективности производственных процессов, подготовку кадров и повышения квалификации работников отрасли, внедрение инноваций и обеспечение глобальной конкурентоспособности.

По состоянию на ноябрь 2020 года на верфях России размещены св. 90 заказов на рыболовные суда, из которых почти половина - на предприятиях ОСК. По плану все они должны быть спущены в воду к 2025 году, некоторые уже сданы заказчику. По данным Коллегии Росрыболовства - 2020, принятые меры позволят обновить около 2/3 профильных судов в Северном бассейне и около 1/4 — на Дальнем Востоке. Но, важно и другое. Строящиеся суда имеют более высокие эксплуатационные характеристики, более рентабельны, с меньшим сроком окупаемости. Кроме того, они формируют спрос на новые технологии переработки, включая производство более ценной продукции, рециклинг и т.д. И, наконец, они будут стимулировать создание специализированных научных и инжиниринговых центров, региональных техно- и промышленных парков в приморских регионах России.

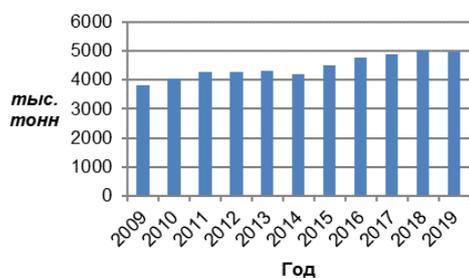
Сложными моментами процесса обновления отечественного рыболовного флота переходного периода восстановления гражданского судостроения является потеря опыта гражданского судостроения, низкая локализация судового и берегового оборудования, включая современные заводы по рыбопереработке, отсутствие актуальных отечественных проектов рыболовных судов различного класса, конкурентоспособных с лучшими образцами зарубежного производства, вынужденность строительства по проектам зарубежных компаний. Отсюда дополнительные издержки, включая финансовые и временные. В других новых технологических направлениях, связанных с переходом РХК на цифровые платформы также имеются свои проблемы - недостаточный уровень цифровизации отрасли, слабые вычислительные мощности, недостаток программистов и отечественных программных продуктов и др.

Резюмируя, сегодняшнее состояние отрасли не позволяет обеспечить обновление рыболовного флота по отечественным проектам и на отечественных верфях в условиях открытой конкуренции – необходимо новая сборка творческих коллективов проектантов судов и судового оборудования, привлечение современных технологий проектирования рыболовных судов,

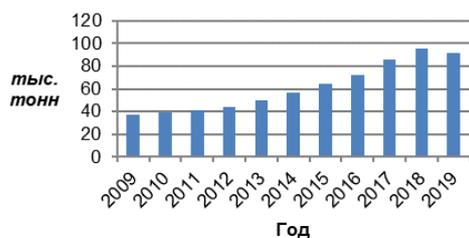
включая технологии «цифрового двойника», AR/VR и аддитивные технологии, новые материалы и технологии. Поэтому в части развития рыболовного судостроения в России назрела необходимость создания специализированного национального инжинирингового центра рыбной отрасли (далее НИЦРО), способного консолидировать инженерные и образовательные усилия РХК.

5. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года

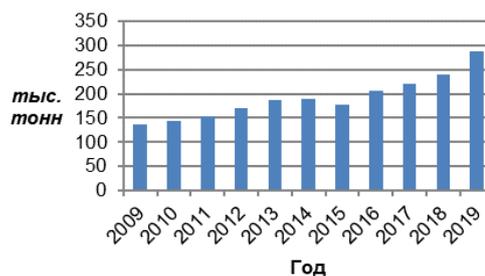
В Стратегии РХК – 2030 отмечается, что рыбопромысловый флот является основной материально-технической РХК, составляет более 70 % основных производственных фондов отрасли и обеспечивает св.90 % общего вылова. Непосредственно на судах производится св. 92 % общего объема мороженой продукции, более 96 % рыбной муки и около 15 % консервной продукции [3]. Однако производство такой продукции с невысоким переделом ведет к тому, что в экспортных поставках преобладает сырьевая продукция с низкой ценой, в среднем менее \$2/кг, св. 90 % которой перерабатывается за пределами страны, и уже в переработанном виде, частично возвращаясь в Россию в виде реэкспорта. На рисунках 7-9 представлены основные финансово-экономические показатели по добыче ВБР с выделением объемов добычи краба (рисунок 8) и общего объема продукции товарной аквакультуры в России за последнее десятилетие. Потери России от сырьевой ориентированности экспорта рыбной продукции были проанализированы ранее, на рис.10 они представлены с оценками упущенной выгоды рыбной отрасли, выполненными по уточненным данным материалов Коллегии Росрыболовства в 2010 – 2020 гг..



Источник: Авторская разработка
Рис.7. Добыча ВБР в 2009-2019 гг



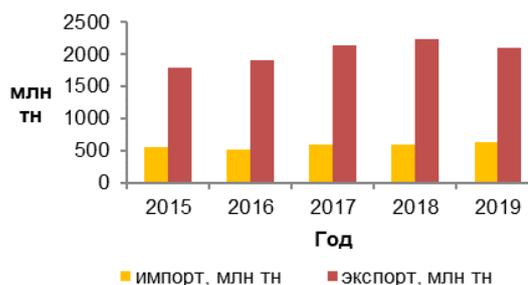
Источник: Авторская разработка
Рис.8. Добыча краба в 2009-2019 гг



Источник: Авторская разработка

Рис.9. Общий объем продукции товарной аквакультуры в 2009-2019 гг

В заключении отметим рост оборота организаций рыболовства и рыбоводства в течение 2016-2019 гг с 247 млрд руб в 2016 году до 369,2 млрд руб в 2019 году, показав среднегодовой рост в 12,4%, но имеет тенденцию к снижению темпов роста: с 25,5% в 2016-2017гг, до 9,4% в 2017-2018гг и 8,9% в 2018-2019 гг. Реструктуризация производственной системы РХК в региональные производственные и транспортно-логистические сети на цифровых платформах, координируемых СЦ обеспечит переход отрасли на новый технологический уровень, от экстенсивного на интенсивный путь развития.



Источник: Авторская разработка

Рис. 10. Объемы импорта и экспорта ВБР с оценкой упущенной выгоды рыбной отрасли, выполненной по данным заседания Коллегии Росрыболовства в 2016-2020 гг

С 2015 по 2019 гг упущенная выгода рыбной отрасли, вычисленная в виде разницы между реальными объемами экспортных поставок в этот период и расчетным объемом экспорта, если бы он осуществлялся по ценам импорта по тем же годам составила по уточненным данным последних лет, приведенным в материалах Коллегии Росрыболовства [18], \$11,034 млрд. Она росла в течение четырех лет, составляя в 2015 г – \$1,548 млрд, 2016 - \$2,292, 2017 - \$2,484, 2018 - \$2,923 млрд,

а в 2019 году тенденцию можно считать Росрыболовство сумело переломить, упущенная выгода снизилась до \$1,787, если эта тенденция снижения упущенной выгоды продолжится в 2020 и последующих годах. В этой связи отметим, что дисбаланс в ценовой политике экспорта и импорта продукции рыбной отрасли характеризует технологическое и инфраструктурное отставание РХК, реализацию политики экстенсивного развития, недостаточное внимание к совершенствованию и углублению процессов переработки ВБР, диверсификации деятельности, отсутствие достаточного внимания к совершенствованию технологических процессов, недостаточное внимание к инновационной политике.

Из всех трех стратегий развития ключевых взаимосвязанных секторов морской экономики: судостроения, морской деятельности и РХК, Стратегия РХК-2030 года наименее проработана как в научно-организационном инновационном плане, так и в плане развития производственной сферы, диверсификации своей деятельности, расширения рынков сбыта, профессиональной подготовки кадров. Она не стыкуется с рядом важных документов - с Национальной технологической инициативой, с принятой программой цифровизации экономики России, с национальными целями развития Российской Федерации на период до 2030 года и др. документами государственного стратегического планирования и управления.

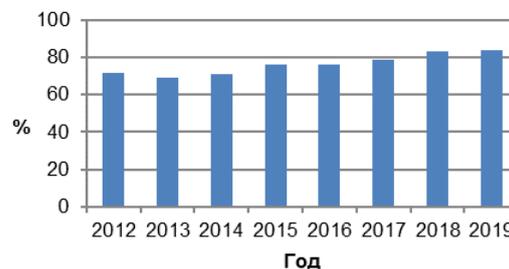
К сожалению, за прошедшее со дня принятия Стратегии РХК-2030 время ситуация в отрасли не поменялась в этом плане и продолжает соответствовать достаточно странной позиции Росрыболовства в части возможностей развития: «В экономике Российской Федерации основные возможности для развития и глобальной конкурентоспособности предприятий рыбохозяйственного комплекса открываются при значительном ослаблении российской национальной валюты по отношению к основным мировым валютам» ([3], с.15).

В материалах Коллегии Росрыболовства отмечается: «Главными задачами ФГБНУ «ВНИРО» являются комплексное изучение водных биологических ресурсов и среды их обитания, осуществление государственного мониторинга состояния водных биологических ресурсов, оценка их запасов, определение общего допустимого улова и рекомендованного вылова, разработка рекомендаций по рациональному использованию водных биоресурсов, ведению промысла и использованию сырья, оптимизации работы отечественного рыбопромыслового флота, разработке мероприятий по сохранению и воспроизводству водных биологических ресурсов» [27]. То есть вопросы инжиниринга, важнейшего направления реального сектора современной экономики не включены в компетенцию ВНИРО.

С другой стороны, в Государственные задания университетам отрасли ежегодно включаются только НИР и вопросы инжиниринга переложены на университеты без соответствующего целевого финансирования с расчетом на то, что ОКР и ПКР будут выполняться по договорам с бизнес-структурами. Как уже отмечалось, спецификой бизнес-пространства Российской Федерации

является крайне неохотное участие бизнеса в финансировании инновационных, венчурных проектов и программ, вследствие высокого риска и достаточно длительного времени выхода на устойчивое производство новой продукции, что неприемлемо для бизнеса в условиях турбулентной экономики. Поэтому в планировании и ресурсном обеспечении НИОКР и ПКР отрасли образовалась своеобразная лагуна.

Стратегия РХК-2030 недостаточно соответствует НТИ, в ней не заложена разработка новых технологий глубокой переработки ВБР, освоение рециклинга, развитие судового оборудования по организации вылова, транспортировке и переработке ВБР. Норвегия, являющаяся лидером в рыбной отрасли и активно развивающая новые технологии в 2019 году экспортировала морепродукты на сумму более 107 миллиардов норвежских крон (ок.\$11, 2 млрд), Россия – вдвое меньше, на сумму \$5,18 млрд [18]. Доля рыбной отрасли Норвегии в ВВП страны составляет около 4 процентов, причем последние семь лет наблюдается непрерывный рост степени использования отходов, рисунок 11. Это связано с вводом в эксплуатацию новых крупных рыболовных судов, на которых обеспечивается лучшая переработка ВБР с помощью компактной установки для извлечения масла, белка и костей из остаточного сырья, рис 12. Производительность установки 2 т/час, занимаемая площадь – 100 кв.м. Установка аналогичного назначения спроектирована в КГТУ, размещается в стандартном морском контейнере, производительность 3т/сутки.



Источник: Авторская разработка

Рис.11. Степень переработки отходов ВБР, %



Источник: NUAS Technology

Рис.12. Компактная масштабируемая установка для переработки остаточного сырья

По оценкам ОЭСР, вклад морской экономики в мировой ВВП к 2030 году удвоится по сравнению с 2010 годом и значительную роль в этом сыграют новые технологии и углубление рециклинга.

В Стратегии РХК-2030 слабо отражен критический уровень старения исследовательской

аппаратуры, испытательных стендов и тренажеров. Рост производительности труда заложен низкий, примерно 3% ежегодно, что не коррелирует с НТИ, планами модернизации отрасли и целями достижения конкурентоспособности с рыбными отраслями зарубежных стран. Такой ориентир не может обеспечить достижение РХК лидирующих позиций на мировых рынках рыбной продукции.

С учетом проведенного анализа Стратегии МД-2030, ССП-2035 и РХК-2030 можно сформулировать факторы развития и обеспечения конкурентоспособности РХК России:

- развитие специализированного рыболовного судостроения на основе долгосрочного планирования в комплексе с выделением квот на добычу ВБР на стабильной нормативно-правовой основе;
- разработка новых технологий в направлениях: умные, селективные методы промысла SmartFish, обеспечение контроля качества по всей технологической цепочке, интеграция новых технологий и оборудования, автоматизация процессов;
- организация национального инжинирингового центра рыбной отрасли, ответственного за рыболовное судостроение, инноватику, инженерную модернизацию и цифровизацию отрасли;
- создание экосистем порта, региона, рыбной отрасли в цифровой экономике, новой системы управления в производстве и региональных СЭС на основе ЦП и СЦ с системным обновлением рыболовного флота, судового оборудования и аппаратуры;
- цифровизация производственных и управленческих процессов в региональных сетевых системах на основе цифровых моделей судов, перерабатывающих производств, транспортно-логистических предприятий и потребительских организаций;
- реструктуризация системы профессионального образования, непрерывное повышение знаний и обновление компетенций работников отрасли на основе фундаментальных знаний, достижений науки и инноватики с использованием специализированной образовательной ЦП рыбной отрасли.

Отметим, каждый из перечисленных факторов не может в полной мере привести к нужному результату, одновременная их реализация запустит волновые процессы в РХК России, способные поднять рыбную отрасль на новый уровень развития со всеми преимуществами цифровой экономики. Фундаментом обеспечения глобальной конкурентоспособности РХК является наука, образование и инноватика, выстроенные на цифровых платформах и киберфизических системах.

Заключение

Три стратегии развития в ключевых взаимосвязанных секторах морской экономики: Стратегия МД-2030, Стратегия ССП – 2035 и Стратегия РХК -2030, подготовленные разными ведомствами и разными творческими коллективами свидетельствуют о необходимости стратегических перемен в геополитически важных для России секторах экономики и пересекаются в пространстве

РХК России. Ключевым моментом стратегических перемен является формирование государственно-частных экосистем на ЦП на уровне порта, региона, отрасли, выстроенных по принципу «матрешки». Для этого необходима ускоренная цифровизация отрасли, развитие ЦП, автоматизация вылова и переработки ВБР, выделение рыболовного судостроения в самостоятельный сектор гражданского судостроения, углубление переработки сырья, рециклинг и оптимизация распространения готовой продукции.

В целом экосистемный подход позволяет обеспечить трансформацию экономики предложения в экономику спроса, основанную на экосистемах потребителей, партнеров, поставщиков ВБР и разработчиков продуктов, объединенных в единую экосистему РХК страны, фундаментальной инновацией которой является переход от классической бизнес-модели к бизнесу, основанному на ЦП. Такая трансформация находится в большем соответствии с принципами устойчивого развития и может найти интересное продолжение в социотехнических системах, в которых центральное место отводится человеку [17]. Следует отметить, что в глобальных масштабах Мирового океана новые технологии дополняя, сочетаясь и взаимодействуя друг с другом, должны сформироваться в единый инструментарий управления рыбными запасами, и управления рыболовством в будущем не будет зависеть от какой-либо отдельной технологической инновации.

Основными факторами развития РХК и обеспечения продовольственной безопасности России, является ускоренное обновление рыболовного флота и всей производственной инфраструктуры РХК на основе развития новых технологий и расширения периметра деятельности РХК, цифровизации производственных и управленческих процессов, непрерывного повышения знаний и обновления компетенций работников отрасли.

Рассмотренные меры позволят заполнить пробел в морехозяйственной деятельности - обеспечить системное пространственно-производственное цифровое планирование и создание в концепте «Морская акватория – Приморская территория» сетей бизнес - единиц, объединенных единой целью рациональной добычи, безотходной переработки и доставки потребителю высококачественной продукции на основе ВБР с минимальными транзакционными издержками. У России есть возможность выйти в лидеры в организации моделей региональных экосистем, цифровых производственно-потребительских сетей в рыбной отрасли, которые могут найти широкое применение в странах, имеющих выходы к Океану, в частности, - в странах БРИКС.

Необходимо внести изменения в Стратегию РХК – 2030 в установленном порядке с учетом рассмотренного расширенного периметра РХК как объекта стратегического планирования и управления, включив следующие разделы из смежных областей:

- судоремонт, судостроение и специализированное оборудование, включая морские дроны, оснастка и аппаратура для РХК;

- современные технологии добычи ВБР и переработки в контекстах бережливого производства, ресурсосберегающих и безотходных технологий, создание спектра современной новой продукции с высокой добавочной стоимостью;
- создание морских мобильных перерабатывающих модулей ВБР и полномасштабных производств на приморских территориях, связанных единой политикой, экономикой, производственной логистикой, транспортом и связью;
- создание отраслевой и региональных специализированных сетей по дистрибуции и розничным продажам продукции переработки ВБР по всей стране и за рубежом, с применением IT- технологий;
- переход к цифровой экономике в РХК, имея в виду формирование государственно-частных экосистем на ЦП на уровне порта, региона,

отрасли, создание сетевых производств, ключевыми элементами которых должны стать СЦ, охватывающие разведку, оценку и рациональную добычу ВБР, их комплексную переработку и поставку на рынки.

Организационно-методическая работа по совершенствованию Стратегии РХК-2030 может быть возложена на Национальный инжиниринговый центр рыбной отрасли.

Работа выполнена в соответствии с утвержденным Федеральным агентством по рыболовству тематическим планом прикладных научных исследований, выполняемых коллективом университета в 2020 году, в рамках темы: «Разработка рекомендаций по переходу рыбной отрасли к платформенной экономике».

Литература

1. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства России от 30 августа 2019 г. № 1930-р,
2. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года. Распоряжение Правительства от 28 октября 2019 г. № 2553-р
3. Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года, Распоряжение Правительства России от 26 ноября 2019 г. № 2798-р.
4. The ocean economy in 2030, OECD Publishing, Paris (2016).
5. Joint communication to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions International ocean governance: an agenda for the future of our oceans/ {SWD(2016) 352 final} Brussels/
6. Maitakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Yafasov A.Y. A universal model of a subject area for situational centers. Communications in Computer and Information Science (см. в книгах). 2019. Т. 947. С. 415-423.
7. Кострикова Н.А., Майтаков Ф.Г., Яфасов А.Я. Современные тренды цифровизации экономики и перспективы их использования в морской индустрии на примере рыбохозяйственного комплекса России. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-4 (46). С. 126-139
8. Jean-Charles Rochet; Jean Tirole (2003). "Platform Competition in Two-Sided Markets". Journal of the European Economic Association. 1 (4): 990—1029.
9. NASA: Climate Change and Global Warming <https://climate.nasa.gov/>
10. Гурьянов А.В., Заколдаев Д.А., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О. Организация цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 268–277. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277
11. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment // International Journal of Production Research. 2017. V. 55. N 9. P. 2590–2602. doi:10.1080/00207543.2016.1245883
12. Peter H. Diamandis, Steven Kotler. The future is faster than you think: how converging technologies are transforming business, industries, and our lives. Description: New York: Simon & Schuster, 2020. ISBN 978-1-9821-0968-4 (ebook).
13. Maille O'Donnell/ GFI"s Symposium Highlights Fermentation"s Critical Role in the Alternative Protein Industry/ - October 29, 2020 / <https://www.gfi.org/blog-fermentation-symposium-recap>
14. ФАО. 2020. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2020. Меры по повышению устойчивости. Рим, ФАО, 223 с. <https://doi.org/10.4060/ca8642ru>
15. Кострикова Н.А., Меркулов А.А., Яфасов А.Я. Технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов. Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3-1 (37). С. 135-141.
16. F.G.Maitakov, A.A.Merkulov, E.V.Petrenko, A.Ya.Yafasov. Development of Decision Support Systems for Smart Cities. Springer Nature Switzerland AG 2019. A. Chugunov et al. (Eds.):EGOSE 2018, CCIS 947, pp. 52–63, 2019.
17. Polyakov R 2020 Scientific And Innovative Environment Of Spatially Localized Economic Systems (European Publisher) cc 492–502

References

1. Strategy for the development of maritime activities of the Russian Federation until 2030. Order of the Government of Russia dated August 30, 2019 No. 1930-r,
2. Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035. Government Order of October 28, 2019 No. 2553-r

3. Strategy for the development of the fishery complex of the Russian Federation for the period until 2030, Order of the Government of Russia dated November 26, 2019 No. 2798-r.
4. The ocean economy in 2030, OECD Publishing, Paris (2016).
5. Joint communication to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions International ocean governance: an agenda for the future of our oceans / {SWD (2016) 352 final} Brussels /
6. Maitakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Yafasov A.Y. A universal model of a subject area for situational centers. Communications in Computer and Information Science (see books). 2019. Vol. 947, p. 415-423.
7. Kostrikova N.A., Maitakov F.G., Yafasov A.Ya. Modern trends in digitalization of the economy and the prospects for their use in the marine industry on the example of the fishery complex of Russia. Marine Intelligent Technologies. 2019. No. 4-4 (46). S. 126-139
8. Jean-Charles Rochet; Jean Tirole (2003). "Platform Competition in Two-Sided Markets". Journal of the European Economic Association. 1 (4): 990-1029.
9. NASA: Climate Change and Global Warming <https://climate.nasa.gov/>
10. Guryanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O. Organization of digital production in Industry 4.0 based on cyber-physical systems and ontologies // Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics. 2018. Vol. 18. No. 2. P. 268–277. doi: 10.17586 / 2226-1494-2018-18-2-268-277
11. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment // International Journal of Production Research. 2017. V. 55. N 9. P. 2590-2602. doi: 10.1080 / 00207543.2016.1245883
12. Peter H. Diamandis, Steven Kotler. The future is faster than you think: how converging technologies are transforming business, industries, and our lives. Description: New York: Simon & Schuster, 2020. ISBN 978-1-9821-0968-4 (ebook).
13. Maille O'Donnell / GFI "s Symposium Highlights Fermentation" s Critical Role in the Alternative Protein Industry / - October 29, 2020 / <https://www.gfi.org/blog-fermentation-symposium-recap>
14. FAO. 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Measures to Increase Resilience. Rome, FAO, 223 pp. <https://doi.org/10.4060/ca8642ru>
15. Kostrikova N.A., Merkulov A.A., Yafasov A.Ya. Synthesis technology of distributed intelligent control systems as a tool for sustainable development of territories and complex objects. Marine Intelligent Technologies. 2017. No. 3-1 (37). S. 135-141.
16. F. G. Maitakov, A. A. Merkulov, E. V. Petrenko, A. Ya. Yafasov. Development of Decision Support Systems for Smart Cities. Springer Nature Switzerland AG 2019. A. Chugunov et al. (Eds.): EGOSE 2018, CCIS 947, pp. 52–63, 2019.
17. Polyakov R 2020 Scientific And Innovative Environment Of Spatially Localized Economic Systems (European Publisher) cc 492-502

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абдурашид Яруллаевич Яфасов, доктор технических наук, начальник управления инновационной деятельностью, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: yafasov@list.ru

Abdurashid Y. Yafasov, Dr. Sci. (Eng), Head of Innovation Management, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: yafasov@list.ru

Александр Алексеевич Меркулов, кандидат технических наук, руководитель технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1., e-mail: vsmcenose@mail.ru

Aleksandr A. Merkulov Ph.D. (Eng), Head of KSTU Technopark, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1, e-mail: vsmcenose@mail

Руслан Константинович Поляков, кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательской деятельности, Калининградский государственный технический университет 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Ruslan K. Polyakov, Ph.D. (Econ), Associate Professor, the Head of Department of Scientific Research, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Федор Георгиевич Майтаков, ведущий специалист технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: maitakov@mail.ru

Fedor G. Maitakov, Leading Specialist of Technopark Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy pr., 1, e-mail: maitakov@mail.ru

УДК 332.1

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.078

Национальный инжиниринговый центр рыбной отрасли России

А.Я. Яфасов¹, Р.К. Поляков¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Анализ рыбной отрасли России показал ряд проблем, связанных с отсутствием интегрированного подхода к созданию прибавочной стоимости по всей цепочке производственной деятельности: от вылова рыбы до поставки готовой продукции потребителям на основе единого планирования экономической деятельности на судах и предприятиях приморских регионов. Ключевыми элементами модернизации рыбной отрасли России являются реинжиниринг и переход на цифровые платформы. В России нет специализированного инжинирингового центра, который системно занимался бы проблемами модернизации отрасли со знанием её специфики и целостного восприятия. Целью данной работы является обоснование необходимости создания и разработка концепции национального инжинирингового центра рыбной отрасли России в качестве центра, интегрирующего новации в рыбной отрасли. На основе системного анализа показана необходимость создания такого центра в структуре Росрыболовства с размещением на территории Особой экономической зоны в Калининградской области, характеризующейся значительными преференциальными условиями и возможностями для цифрового судостроения и производств глубокой переработки водных биологических ресурсов. Проведен анализ рынка и ресурсов, разработаны организационная структура и концепция Дорожной карты центра, выполнен анализ рисков реализации проекта создания центра, показаны перспективы развития цифрового инжиниринга в рыбной отрасли. Создание центра позволит приступить к системному импортозамещению оборудования в концепте «Интеллектуальная система»: рыболовное судостроения – судовое оборудование для вылова, перевалки и транспортировки улова – специализированные судовые и береговые производства по переработке морепродукции – логистические центры поставщик - потребитель. Предлагаемый концепт позволит интегрировать инженерные и технологические новации в рыбную отрасль во взаимосогласованном виде.

Ключевые слова: стратегия развития, рыбная отрасль, инжиниринговый центр, рыболовное судостроение, кластеры, цифровые платформы и технологии, ситуационные центры

National engineering center of the fishing industry of Russia

Abdurashid Y. Yafasov¹, Ruslan K. Polyakov¹¹Kaliningrad state technical university, Russian Federation

Abstract. Analysis of the Russian fishing industry has showed a number of problems associated with the lack of an integrated approach to creating added value along the entire production chain: from fishing to supplying finished products to consumers on the basis of a unified planning of economic activities on ships and enterprises in coastal regions. Reengineering and transition to digital platforms are key elements of modernizing the Russian fishing industry. There is no specialized engineering center in Russia that would systematically deal with the problems of modernizing the industry with knowledge of its specifics and holistic perception. The purpose of this work is to substantiate the need to create and develop the concept of a national engineering center for the fishing industry in Russia as a center that integrates innovations in the fishing industry. Based on a systematic analysis, the need is shown of creation such a center in the structure of the Federal Agency for Fishery with placement on the territory of the Special Economic Zone in the Kaliningrad Region, characterized by significant preferential conditions and opportunities for digital shipbuilding and production of deep processing of aquatic biological resources. The analysis of the market and resources has been carried out, the organizational structure and the concept of the Roadmap of the center have been developed, the risks of the implementation of the project for the creation of the center have been analyzed, the prospects for the development of digital engineering in the fishing industry have been shown. Creation of the center will allow starting a systematic import substitution of equipment in the concept of "Intelligent System": fishing shipbuilding - ship equipment for catching, transshipment and transportation of the catch - specialized ship and onshore processing facilities for seafood - logistics centers supplier - consumer. The proposed concept will allow integrating engineering and technological innovations into the fishing industry in a mutually agreed manner.

Keywords: development strategy, fishing industry, engineering center, fishing shipbuilding, clusters, digital platforms and technologies, situational centers

Введение

Интеллектуальное управление технологиями стало приоритетной задачей для России, которую необходимо решить в ближайшее десятилетие. Несмотря на многочисленные трудности, с которыми сталкивается страна, в том числе, с экономическими и политическими на международном уровне, ей необходимо постоянно создавать и развивать точки инновационного роста в новом технологическом укладе, так как в противном случае она на долгие годы может стать сырьевым придатком развитых и развивающихся стран.

Судостроение, включая инжиниринговые услуги - это глобальный, высоко конкурентный и постоянно меняющийся рынок. Он зависит от состояния мировой экономики, изменений Мирового океана, колебаний мировой торговли, востребованности транспортных услуг, спроса на водные биологические ресурсы (ВБР), объёмов вылова рыбы. Как рынок судостроения, так и спрос на инжиниринговые услуги зависят от показателей, подверженных постоянным изменениям. Это придает судостроительному рынку цикличность: спрос на суда увеличивается во время

экономического роста и падает во время рецессии [1].

Для рыболовного судостроения важно проектирование и изготовление судов, синхронизированное с созданием новых типов оборудования для вылова и переработки ВБР, так как качество системы определяется качеством самого слабо проработанного элемента системы. Для России важно создание своей промышленности гражданского судостроения, конкурентоспособной на мировом рынке. В силу ряда причин, в стране сложилась не лучшая ситуация в части строительства рыболовных судов: сегодня практически все проекты рыболовных судов и судовое оборудование импортного происхождения.

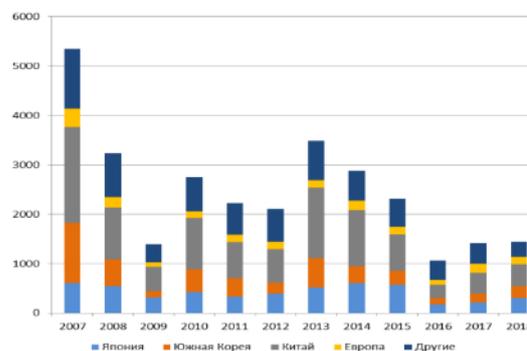
Следует отметить, серийное строительство рыбопромысловых судов является сложной задачей, решение которой позволит укрепить одну из трех опор Продовольственной безопасности России – рыбную отрасль. Согласно принятой «Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года» запланирован перевод гражданского судостроения на системную основу с учетом новых возможностей современных технологий проектирования и строительства гражданских судов. При этом акцент сделан на создание новой конкурентоспособной судостроительной промышленности России на основе развития научно-технического, инновационного и кадрового потенциала, направленного на модернизацию производственных мощностей с широким использованием цифровых технологий [2].

Опыт растущего строительства рыболовных судов последних трех лет показал ряд проблем, связанных с тридцатилетним перерывом в проектировании и создании судов такого типа. К ним относятся: дефицит квалифицированных кадров, отсутствие опыта проектирования и производства современного судового оборудования, недостаток программных продуктов и вычислительных мощностей, новых подходов к системному решению процессов добычи и переработки ВБР, отсутствие в стране интегрирующего центра, способного объединить лучшие отечественные и зарубежные достижения по созданию судов, судового оборудования и береговой инфраструктуры для рыбной отрасли.

Целью данной работы является обоснование необходимости создания и разработка концепции национального инжинирингового центра рыбной отрасли России (НИЦРО) в качестве такого интегрирующего центра.

1. Обзор рынка судостроения

Динамика новых заказов на постройку судов в мире в 2007-2018 гг представлена на рисунке 1. Сильная динамика изменения заказов на строительство судов показывает на необходимость гибкой ценовой политики и непрерывного реинжиниринга производства.

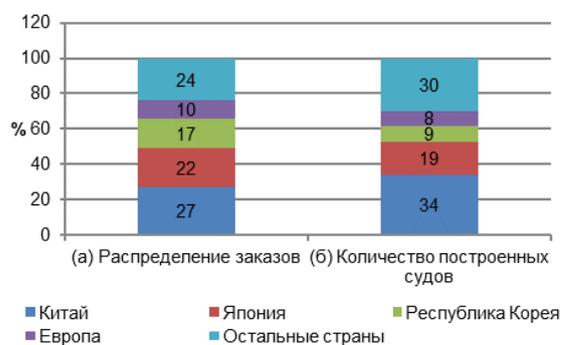


Источник: Clarkson Research

Рис. 1. Динамика изменения заказов на постройку судов в мире, 2007-2018 гг.

В апреле 2017 года рабочая группа ОСЭР опубликовала анализ сложившихся к тому времени дисбалансов в судостроительной промышленности, показавший, что экономическое и финансовое положение судостроительной отрасли стало неустойчивым вследствие развития рыночных дисбалансов в результате финансового кризиса и ослабления цен на суда [14]. Выходом из сложившейся ситуации стала реструктуризация одних верфей, закрытие других и объединение третьих в целях устранения избыточных мощностей, модернизации производства и повышения эффективности. В контексте ГЧП государствам рекомендовалось принять участие в утилизации физических объектов, поддержке НИОКР в виде субсидий, если речь шла о плавной реструктуризации в другие области бизнеса, в перераспределение занятости.

В 2018 году на три ведущие судостроительные страны в мире - Китай, Корею и Японию пришлось св. 60% построенных судов в мире и 2/3 общего количества судостроительных заказов. Ценовая политика на европейском и азиатском рынках различается значительно. Рыболовное судостроение в Китае получило в последние 15 лет существенное развитие и практически сравнялось по качеству с европейским судостроением при более низких ценах на продукцию судостроения. Относительное распределение заказов на постройку судов по странам в 2018 г. представлено на рисунке 2а, а общее количество построенных судов по странам за этот же год – на рисунке 2б.



Источник: Clarkson Research

Рис. 2. Распределение заказов на постройку судов в 2018 г. (а) и общее количество построенных судов за этот же год – (б)

Российское гражданское судостроение занимает скромное место в мировом судостроении, его объем в последние несколько лет составляет 0,5-0,6% объема сданного тоннажа судов в мире. Например, в части рыболовных судов, средний судостроительный завод в Китае, не входящий в 1-ую десятку крупных судостроительных заводов страны, строит в год больше рыболовных судов, чем вся наша судостроительная промышленность. Поэтому конкуренцию с такими гигантами судостроения можно выиграть только за счет высокого качества и эффективности судов, непрерывно внедряя в проекты и производства инженерные новации.

Практически все гражданские суда последнего десятилетия за исключением ледокольного флота и судов на воздушной подушке, строились по проектам иностранных компаний, причем 40% из них на предприятиях ОСК, со всеми вытекающими обязательствами по необходимости переделки проектов и адаптации технической документации к технологической базе предприятий, имеющемуся у заказчика оборудованию, требованиям Российского

морского регистра судоходства (РС), Российского речного регистра (РРР) и т.д.

В 2018 году было построено для российских заказчиков в общей сложности 150 судов, из которых 114 судов на российских верфях, 36 на иностранных судостроительных заводах. В 2019 году строительство судов на отечественных судостроительных заводах выросло до 118 судов, а на иностранных снизилось до 17 судов, всего было построено 135 морских и речных судов [12]. Таким образом, проводимая политика импортозамещения и локализации строительства гражданских судов на отечественных верфях начала давать свои первые плоды. Если за период с 2010 по 2017 гг было построено 682 судна, в среднем 85 судов в год, то в последние 2 года она выросла в среднем на 36% от этой величины, а всего за 2010-2019 гг построено на отечественных верфях 914 судов.

В таблице 1 приведены данные, по развитию гражданского судостроения в России за последние пять лет.

Таблица 1.

Развитие гражданского судостроения в России

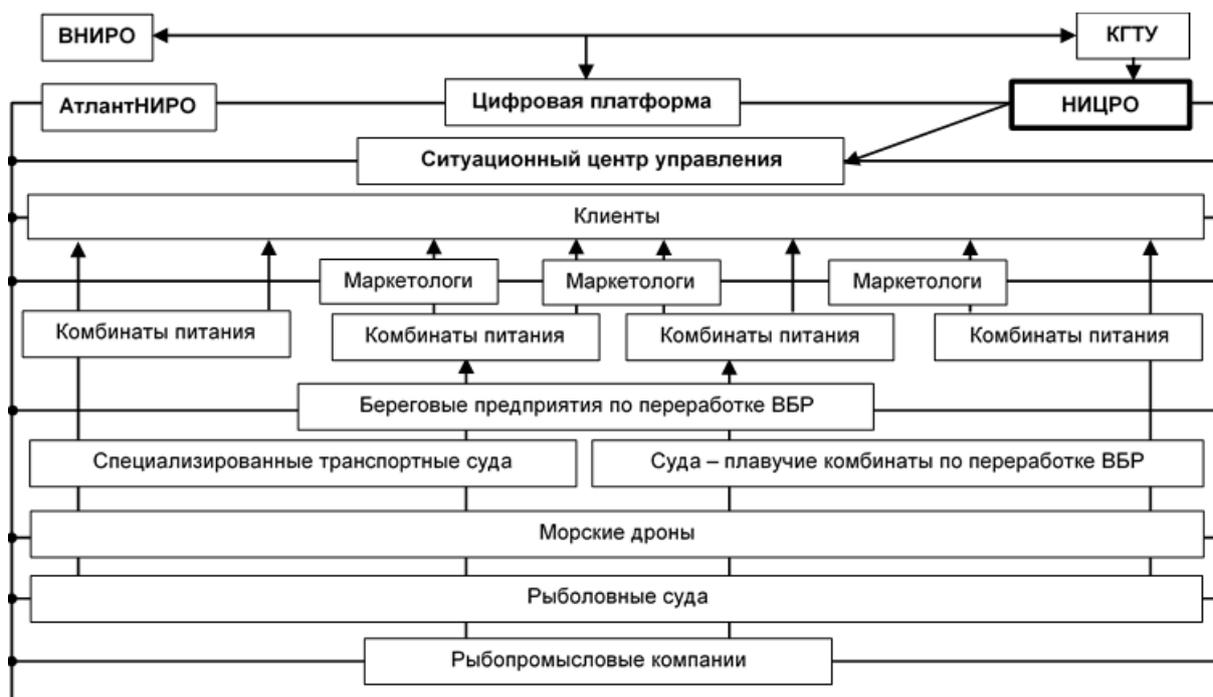
Показатель	Год				
	2015	2016	2017	2018	2019
Построено судов гражданского назначения, шт.	113	103	86	114	118
Построено судов гражданского назначения, тыс. тонн совокупного тоннажа	136,3	158,7	184,1	210	283,8
Общая стоимость построенных в России судов гражданского назначения, млрд руб.	21,8	42,5	31,8	46,3	79,1
Импорт судов гражданского назначения в РФ, млрд долл.	1,25	2,00	2,37	За 8 месяцев 1,20	За 8 месяцев 1,19

Источник: Росстат, Минпромторг РФ, ИАА «ПортНьюс», Институт «Центр развития» НИУ ВШЭ, расчеты авторов

2. Возрождение рыболовного судостроения и производства судового оборудования в России

Возрождение рыболовного судостроения в России должно идти не по пути калькирования вчерашних инженерных решений зарубежного судостроения, а строиться на новой основе с использованием новых технологий, цифровых платформ (ЦП), «цифровых двойников». В ЦП должны закладываться как рыболовные суда и вся специализированная оснастка для обеспечения

эффективного вылова ВБР, так и дальнейшие все процессы транспортировки и переработки продукции в виде организационных и инженерных решений. Поэтому оптимальным вариантом является планирование и обеспечение работы рыболовных, рыботранспортных и рыбоперерабатывающих судов, морских дронов, базовых береговых предприятий по переработке ВБР и комбинатов питания, торговых и транспортных компаний из единого центра координации и управления, рис.3.



Источник: авторская разработка

Рис. 3. Сетевая структура регионального рынка продукции с использованием цифровой платформы в концепте «Морская акватория – Приморская территория». Источник: авторская разработка.

Разработка таких систем может стать компенсирующим фактором той неопределенности перспектив российского судостроения, которую вносят санкции западных стран в отношении России и турбулентные процессы в мировой экономике. Равное партнерство со своими западными коллегами становится реальностью с переходом в цифровую экономику с учетом наработок в области

информационных технологий и ситуационного управления. Такое сотрудничество было бы взаимовыгодным и значительно сократило бы сроки проектирования и строительства рыболовных судов нового поколения. В таблице 2 приведен SWOT – анализ гражданского судостроения в России на примере Калининградской области.

Таблица 2.

SWOT-анализ гражданского судостроения в России на примере Калининградской области

Сильные стороны	Возможности
<ul style="list-style-type: none"> – наличие свободных площадок со всеми подведенными коммуникациями в инфраструктуре порта Калининград для нового строительства, незагруженные мощности верфей в Калининграде, Светлом, Балтийске с перспективой быстрой и малозатратной модернизации инфраструктуры; – наличие мощного комплекса строительных и монтажных организаций в регионе, способных в короткие сроки обеспечить ввод в строй новых производств и модернизацию существующих; – креативное региональное сообщество с развитым чувством инновационного предпринимательства, сильно развитый сектор IT, точной механики и сенсорики, предприятия которого способны в короткие сроки освоить новую продукцию; – льготы ОЭЗ Калининградской области, опыт создания систем стратегического планирования и ситуативного управления «Мозг фирмы», «Интеллектуальный муниципалитет», «Морской дрон» и др; – амбициозная молодая команда «технократов» со стратегическим мышлением в управлении российским анклавом, способная решать крупные задачи по цифровой трансформации экономики; – система профессионального образования в области морской инженерии, судостроения, машиностроения, информационных технологий и биотехнологии переработки ВБР. 	<ul style="list-style-type: none"> – наличие судостроительного кластера с системообразующим предприятием в виде ПСЗ «Янтарь» и 22 средними, малыми и микропредприятиями судостроения; – наличие сильного машиностроительного кластера, способного освоить производство нового оборудования для рыболовных судов и рыбопереработки; – наличие сильного базового университета рыбной отрасли, обеспечивающего непрерывную интегрированную профессиональную подготовку моряков и рыбаков, по всему спектру инженерных профессий, включая переработку ВБР и рециклинг; – национальная технологическая инициатива, распределение квот на добычу ВБР под строящиеся суда, политика государства на импортзамещение и поддержку отечественного производителя; – наличие значительной потребности России в судах рыболовного и иного гражданского флота с дальнейшими перспективами развития лизинга вследствие повышения эффективности строящихся новых судов; – использование потенциала внутреннего рынка и льгот ОЭЗ для развития сотрудничества с зарубежными судостроительными компаниями.

Слабые стороны	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> - инфраструктурное и технологическое отставание от судостроительных и машиностроительных компаний европейских стран, Японии и др. производителей новых судов и иной морской техники в мире; - высокая зависимость от наличия государственной поддержки, слабая вовлеченность бизнеса в ГЧП вследствие нестабильных «правил игры» на рынке, неоптимальной финансово-кредитной политики, влияния неформализованных отношений; - ограниченный доступ российских производителей к передовым мировым технологиям в области судостроения, электроники и сенсорики вследствие перманентно вводимых санкций в отношении Российских компаний. 	<ul style="list-style-type: none"> - международные группы давления и лоббирования интересов зарубежных компаний, рост внешних издержек, связанных с комплектующими изделиями и курсом валют; - ограниченные возможности федеральных и региональных органов власти по обеспечению необходимого уровня поддержки; - рост коррупции, снижение меритократии, ослабление конкурентных механизмов рынка, и, как следствие, - неспособность предприятий гражданского судостроения самостоятельно ликвидировать технологическое отставание от ведущих мировых производителей.

Источник: разработка авторов.

Географическое положение Калининградской области дает уникальные конкурентные преимущества, связанные с близостью к европейским, в первую очередь, к немецким и скандинавским технологическим центрам.

Сформировавшиеся в Северной Европе и Скандинавии кластеры в автомобилестроении, сельском хозяйстве и рыболовстве, судостроении и судовом оборудовании, оборудовании для мобильных и стационарных производств по переработке морепродукции являются сегодня ориентирами для развития отечественного машиностроения, судостроения, электроники, сенсорики и точной техники для целей рыбной отрасли.

Для эффективного социально-экономического развития Калининградской области развит механизм особой экономической зоны (ОЭЗ) [5] и государственно-частного партнерства (ГЧП), несмотря на сложный период 2019-2020 гг, растет число как отечественных, так и зарубежных инвесторов, резидентов ОЭЗ [6].

По состоянию на 16 октября 2020 года в едином реестре резидентов ОЭЗ в Калининградской области зарегистрировано 253 действующих инвестиционных проекта с общим объемом заявленных инвестиций в первые три года реализации – 129,7 млрд рублей и штатной численностью при выходе на проектные мощности в 38,7 тыс единиц [7]. Из них 151 инвестиционный проект с порогом инвестиций от 150 млн рублей на общую сумму в 124,7 млрд рублей и штатной численностью (при выходе на проектные мощности) более 30 тыс. единиц. В течение 2019 года в ЕРР ОЭЗ было включено 46 инвестиционных проектов с общим объемом заявленных инвестиций в первые три года реализации -11,5 млрд рублей и штатной численностью в 2,9 тыс. единиц, из них новых рабочих мест - 2,6 тыс. штатных единиц.

На примере развития деятельности средних предприятий отрасли - группы компаний «За Родину» и «Фишеринг сервиз» наблюдается диверсификация продуктовых линий, рост объемов производства и достаточно хороший прогноз развития профильных рынков. Идет формирование микро и малых предприятий, развитие средних компаний в РХК, причем с использованием Hi-Tech в сфере переработки и вовлечения в хозяйственный оборот отходов рыбной отрасли. Создание НИЦРО позволит приступить к системному импортозамещению в этом секторе судостроения, а также обеспечить организацию ОКР и ПКР, инновационное развитие

всего необходимого и перспективного комплекса судового и берегового оборудования и оборудования для переработки ВБР.

3. Концептуальные подходы к созданию НИЦРО

Целью создания национального инженерного центра рыбной отрасли России является развитие цифровой гражданской судостроения в комплексе с береговой инфраструктурой новых производств переработки ВБР для системной модернизации РХК и повышения экспортного потенциала гражданского судостроения и оборудования по добыче и переработке ВБР.

НИЦРО будет отличаться от большинства существующих инженеринговых центров на базе университетов, нацеленных, в первую очередь, на коммерциализацию разработок своего университета и представляют собой новый инструмент для внедрения НИОКР и ПКР, интеллектуальных заделов сотрудников и творческих групп своего университета в промышленность. Классическим примером являются Инжиниринговый центр университета ИТМО и ряд других.

НИЦРО должен стать универсальным инструментом инновационных преобразований в рыбной отрасли и в реальном секторе экономики приморских регионов России, обеспечивая коммерциализацию не только разработок КГТУ, ученых и инноваторов Калининградского анклава, Росрыболовства, а всего инновационного сообщества страны. В этом смысле он больше будет напоминать межотраслевой инженеринговый центр "Новые материалы, композиты и нанотехнологии" Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана или Центр компьютерного инженеринга С-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Поэтому НИЦРО должен стать консолидирующим центром коммерциализации инноваций в РХК и приморских регионах, работать с любыми региональными проектами высокой степени готовности к внедрению в производство, в первую очередь, по жизненно важным для РХК и приморских регионов направлениям, реализуя сквозные технологии НТИ и возрождая традиции морехозяйственной деятельности России на новой цифровой основе.

Стратегические направления деятельности НИЦРО можно сформулировать следующим образом:

1. Организация инжиниринговых услуг в области судостроения для целей рыболовства и добычи иных ВБР, их переработки в концепте циклической экономики и рециклинга с использованием перерабатывающих модулей судового и берегового размещения, AR/VR, аддитивных и 6D-технологий, «цифровых двойников», ИИ и СЦ.

2. Организация образовательных услуг по реализации дополнительных профессиональных программ в области судостроения и специализированного судового и портового оборудования, добычи и безотходной переработки ВБР в высококачественные продукты питания, биологически активные вещества и добавки (далее БАДы и БАВы), включая автоматизированные производства персонализированных продуктов питания.

3. Организация услуг промышленного дизайна по проектированию судов и портового оборудования, морских дронов, модульных заводов по переработке ВБР судового и портового базирования, построение цифровых моделей изделий, упаковки, объектов и процессов, включая технологии «цифровых двойников».

4. Организация региональной системы социального кейтеринга с использованием морских и местных ресурсов [11], наиболее полно отвечающей Доктрине продовольственной безопасности России, политике социального государства, принципиально важной в условиях анклавности Калининградской области, отдаленности регионов Дальнего Востока, суровости климата и перспектив освоения биоресурсов вод Арктических морей.

Выделяя первым пунктом инжиниринговые услуги в области судостроения для целей добычи ВБР и их переработки, авторы подчеркивают слабые места рыбной отрасли. 90% заказов судостроительных предприятий до последнего времени формировались ВПК [2], вопросы ценообразования на предприятиях ОСК существенно отличаются от ценообразования продукции в частных компаниях, а государственные заказы на строительство судов от контрактов с частными компаниями. Если в первом случае основным критерием является обеспечение технических характеристик и качество продукции, то, во втором случае, для бизнеса важен принцип оптимизации по критерию цена – качество. В связи с этим создание НИЦРО является естественной необходимостью с точки зрения завершения формирования национального кластера рыболовного судостроения в Калининградской области в виде ГЧП, способного существенно снизить цены на отечественную продукцию. При этом наличие ОЭЗ с большими льготами для новых направлений, в частности, IT делает такой кластер привлекательным для инвесторов и открывает возможности привлечения технологических партнеров из европейских стран.

Российская Федерация на примере Калининградской области обладает существенным потенциалом и широкими возможностями для ликвидации технологического отставания от передовых мировых производителей. Поэтому, в целях ускоренной модернизации и ликвидации отставания стране требуется более полно использовать возможности всего накопленного опыта, а также потенциала государственных

механизмов поддержки и программ по импортозамещению и развитию новых технологий в русле НТИ. Это позволит ликвидировать существующий разрыв в области цифрового проектирования, создания современных систем проектирования и строительства рыболовных судов, осуществлять разработку необходимого отраслевого оборудования по вылову и переработке ВБР, создав тем самым фундамент для платформенного роста и необходимый механизм для интенсификации деятельности всего РХК.

Вместе с тем, предоставляя такую платформу высококвалифицированным специалистам, обеспечивая их непрерывный переток в смежные отрасли, посредством организации непрерывной подготовки и реализации дополнительных профессиональных программ, НИЦРО будет способен создать для любого региона модель живой экосистемы, которая будет реагировать на потребности конкретного региона. В условиях жесткой конкуренции, необходимым элементом становятся услуги промышленного дизайна по проектированию судов и портового оборудования, модульных заводов по переработке ВБР судового и портового базирования, построение цифровых моделей изделий, упаковки, объектов и процессов, включая технологии «цифровых двойников».

Системное пространственное планирование и производственное наполнение сетей «Морская акватория – Приморская территория» в виде систем - сетей бизнес-единиц, объединенных единой целью рациональной добычи, безотходной переработки и доставки потребителю высококачественной продукции на основе ВБР с минимальными транзакционными издержками предложено в работах [15–18]. С учетом быстрой цифровизации мировой экономики в морехозяйственной деятельности, будущее за производственными системами, включающими морские суда по добыче ВБР, судовые фабрики переработки ВБР, в том числе отходы – в режиме рециклинга и береговые производственные комплексы, включенные в единую систему – производственную и инженерную, транспортно-логистическую сеть, координируемую из Ситуационного центра (СЦ) с помощью искусственного интеллекта (ИИ). Создание НИЦРО позволит консолидировать такие производственные системы с учетом особенностей каждого приморского региона и флотилий судов по добыче ВБР, как в России, так и за рубежом.

4. Миссия и видение НИЦРО

Миссию НИЦРО можно сформулировать следующим образом: гармоничное развитие рыбной отрасли в качестве комплексных системообразующих сетей МСБ путем создания центров превосходства на единой региональной цифровой платформе в экономике приморских регионов Российской Федерации с выделением Калининградской области в виде модельного пилотного проекта.

Во всех случаях миссия НИЦРО выстраивает стратегическую конвергентную целевую цепочку в соответствии со Стратегией развития рыбохозяйственного комплекса России до 2030 года и приоритетными направлениями деятельности «Гражданское судостроение» и «Цифровые

интеллектуальные технологии для машиностроения» [19,20].

В НИЦРО должны отрабатываться прототипы будущих продуктов, проводиться маркетинговые исследования, анализироваться спрос на него в региональном, национальном и международном масштабах и возможные варианты и алгоритмы постановки продукции на производство. Обязательным условием новой продукции, готовящейся к производству НИЦРО, является её конкурентоспособность на международном рынке, т.е., импорт замещение подразумевает экспорт ориентированность продукции. В зависимости от результатов предиктивного анализа для каждой конкретной задачи коммерциализации:

- создается: в НИЦРО временный творческий коллектив (ВТК) либо МИП на базе университета с участием бизнес-партнера (ов) для коммерциализации конкретного проекта;

- заключается договор с заводом о постановке продукции на производство при техническом сопровождении проекта НИЦРО и назначением куратора проекта от НИЦРО либо передается право пользования комплексом РИД (ОИС), обеспечивающим постановку инновационной продукции на производство на предприятие, холдинг, способном освоить самостоятельно производство такой продукции;

- заключается договор с органами регионального (муниципального) управления, либо управляющими компаниями для внедрения региональной (муниципальной) системы социального кейтеринга с использованием морских и местных ресурсов с адаптацией к местным и региональным условиям при методическом сопровождении НИЦРО, являющимся принципиально важным для успешной реализации проекта.

Во всех случаях особое внимание уделяется юридическим вопросам хозяйственного оборота прав на интеллектуальную собственность и участию студентов, курсантов, аспирантов, научных сотрудников, инженеров и преподавателей университета в инновационных процессах, конструируемых и осуществляемых НИЦРО. В процессе взаимодействия с предприятиями региона НИЦРО планирует брать заказы предприятий по обновлению технологий, цифровизации производственных процессов, созданию нестандартного оборудования и аппаратуры с вовлечением в процесс сотрудничества студенческой творческой молодежи, аспирантов и молодых специалистов, сотрудников технопарка и специализированных кафедр университета, МИП.

В миссии и видении НИЦРО необходимо выделить существенный момент: НИЦРО должен стать мозговым центром диверсификации сферы деятельности РХК с использованием ЦП и глубокой инженерной модернизации всех звеньев своей деятельности и внедрения новых технологий в производство.

Проект НИЦРО направлен на создание своеобразных точек кипения в приморских регионах России по аналогу университетской точки кипения (УТК), созданной в КГТУ в марте 2020 года по инициативе Агентства стратегических инициатив (АСИ) и КГТУ. И если в УТК идет активный обмен

знаниями, идеями и формируются неформальные группы творческой молодежи по научным интересам и инновационным проектам на стадии НИОКР, то в НИЦРО будет происходить такой же активный обмен информацией и деловые встречи по вопросам постановки продукции на производство между бизнесом, предприятиями, инвесторами и коллективом НИЦРО с приглашением ведущих специалистов по обсуждаемой проблеме. Непрерывный форсайт, проводимый НИЦРО по направлениям его деятельности, организация проведения рапид-форсайтов по предложениям предприятий, организаций и потенциальных инвесторов сделает площадку НИЦРО привлекательной как для венчурного, так и успешно работающего бизнеса. В этом случае оптимально сочетается организация профессиональной переподготовки и повышения квалификации кадров по заявкам бизнеса с высококачественным профессиональным образованием, направленным на решение задач реальной экономики региона.

Предоставление образовательных услуг на базе НИЦРО базируется на 3-х максимак: образование: 1) актуально профессиональное, 2) конвергентное, 3) через всю жизнь.

О подготовке кадров акцентированно говорил в своем выступлении на совещании в Морской коллегии 28 апреля 2018 года в Ялте заместитель руководителя Росрыболовства П.Савчук [21]. Он констатировал ежегодное сокращение финансирования и подчеркнул мысль о том, что «развитие образования в РХК не только должно соответствовать Стратегии развития отрасли, но и в определенной степени опережать ее в области подготовки кадров для новых специальностей, прогнозируя прорывные направления развития». Перевод морского рыболовства и рыбоводства, всего РХК в режим инновационного развития, широкомасштабная модернизация и техническое перевооружение отрасли, обновление рыболовецкого флота невозможны без коренного обновления инженерного образования и развития инноватики.

Расширенная диверсификация сферы деятельности РХК как объекта стратегического планирования и управления, должна включать в контексте инновационного развития следующие вопросы из смежных областей:

- судоремонт, судостроение и специализированное оборудование, оснастку и аппаратуру для РХК;

- современные технологии добычи ВБР и переработки в контекстах бережливого производства, ресурсосберегающих и безотходных технологий, создания спектра современной новой продукции с высокой добавочной стоимостью;

- развитие технологий, оборудования и аппаратуры двойного применения;

- создание морских мобильных перерабатывающих модулей ВБР и полномасштабных производств на приморских территориях, связанных единой государственной политикой, производственной логистикой, транспортом и связью в парадигме экономики замкнутого цикла;

- создание отраслевой и региональных специализированных сетей по дистрибуции и

розничным продажами продукции переработки ВБР по всей стране и за рубежом, с применением IT-технологий;

– ускорение перехода к цифровой экономике в РХК, имея ввиду создание сетевых производств, ключевыми элементами которых должны стать ситуационные центры, охватывающие не только разведку, оценку и рациональную добычу ВБР, но и их комплексную переработку и поставку на рынки;

– быстрый перевод в цифру всей аналоговой информации по оценке, промыслу и прогнозированию ВБР, накопленной в НИИ, на предприятиях и организациях РХК и др. ведомств и министерств, в отдельных компаниях страны.

Экспертная оценка текущего состояния в секторах науки, образования и инноваций и, как следствие, корректно сформулированных направлений инвестиций авторами Стратегии развития РХК-2030 не выполнена. Инвестиционный раздел в ней не проработан с точки зрения современной инноватики в направлениях основных треков НТИ. В Стратегии роль отраслевых образовательных организаций в подготовке кадров практически сведена до минимума и не является приоритетной, что противоречит государственной политике России в области научно-технологического развития, НТИ, приоритетного развития человеческого капитала.

Для ряда ключевых областей развития РХК – инфраструктуры, флота, аквакультуры, глубокой переработки ВБР не сформулированы амбициозные (но вполне реальные) цели, отсюда очевидный слабый ожидаемый финансовый результат деятельности отрасли в будущем и низкая роль её на глобальных рынках.

Ранее в работе [11] были представлены тенденции цифровизации глобальной экономики и перспективы их использования в РХК России и отмечалось, что применение ИТ способствует переходу многих технологий в реальных отраслях производства в разряд эмерджентных. Рыбная отрасль отстает в части внедрения инновационных решений в организации и управлении производством, в развитии технологии вылова ВБР, использовании морских дронов, перевалки улова из тралов в суда. Т.е., имеются широкие возможности для инженерных и цифровых инноваций практически во всех значимых звеньях цепочки создания ценности, сетевых систем в РХК. Реализация этих возможностей позволит обеспечить коренную перестройку производственной логистики.

5. Дорожная карта трансформации РХК

Дорожная карта инженерно-цифровой трансформации РХК России на примере Калининградской области в концептуальном виде представлена на рисунке 4.



Источник: Авторская разработка

Рис. 4. Концептуальная Дорожная карта инженерно-цифровой трансформации РХК России на примере Калининградской области

Создание НИЦРО обеспечит постоянный анализ рисков на глобальном, региональном и отраслевые уровнях по ряду важных категорий, включая экономическую, технологическую, инфраструктурную, информационную, геополитическую, социальную, экологическую, риски принятия решений. Такой мониторинг рисков с привлечением ИИ и другого инструментария цифровой экономики, проводимый непрерывно в партнерстве с участниками региональной сети стейкхолдеров, способен обеспечить эффективную производственную деятельность и устойчивое развитие РХК. В заключении следует отметить геополитический фактор в контексте развития информационных технологий в силу того, что геополитическая турбулентность представляет

собой самую сложную системную непредсказуемость, включая: вызовы и ответы, источники и потерпевшие, союзники и враги, победители и проигравшие, кукловоды и марионетки и т.д..

Постоянная связь с судостроительными предприятиями, НПО и НИИ - лидерами отрасли, приглашение для консультаций и чтения лекций выдающихся ученых и судостроителей будет обеспечивать коллективу НИЦРО постоянную актуализацию предложений предприятиям отрасли новых технологий и оборудования, соответствующих быстротекущим глобальным процессам в морской экономике.

Концепция поддержана Агентством стратегических инициатив и вошла план

мероприятий («дорожную карту») «МариНет» Национальной технологической инициативы, утвержденной на заседании президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России [23].

Заключение

Показано, что ключевыми факторами развития рыбохозяйственного комплекса, связанного с продовольственной безопасностью страны, являются непрерывное обновление рыболовного флота и производственной базы на основе развития новых технологий, цифровизация производственных и управленческих процессов, непрерывное повышение знаний и обновление компетенций работников отрасли. Каждый из перечисленных факторов не способен привести к нужному результату, но одновременная их реализация способна запустить волновые процессы в морехозяйственной деятельности России, способные поднять рыбную отрасль на новый уровень развития со всеми преимуществами цифровой экономики.

В системе Росрыболовства отсутствует структура, обеспечивающая цифровизацию отрасли, способная стать базовой структурой обеспечения инженерно-технологической модернизации РХК, ускоренного перехода РХК России на платформенную экономику. Обоснована необходимость создания и исследованы концептуальные вопросы создания национального инжинирингового центра рыбной отрасли России в качестве центра, интегрирующего новации в рыбной отрасли. На основе системного анализа показана необходимость создания такого центра в структуре Росрыболовства с размещением на территории ОЭЗ в Калининградской области, позволяющим создать значительные преференциальные условия и возможности для цифрового судостроения и производств глубокой переработки ВБР. Проведен анализ рынка и ресурсов, разработаны

организационная структура и концептуальная Дорожная карта, выполнен анализ рисков реализации проекта создания центра, показаны перспективы развития цифрового инжиниринга в рыбной отрасли. Создание НИЦПО позволит приступить к системному импортозамещению в комплексе: рыболовное судостроения – судовое оборудование для вылова, перевалки и транспортировки улова – специализированные судовые и береговые производства по переработке морепродукции – логистические центры поставщик - потребитель. Предложено выделение рыболовного судостроения в самостоятельный высокотехнологичный сектор гражданского судостроения с развитием производства оборудования для переработки ВБР, включая рециклинг. Эти меры позволят заполнить пробел в морехозяйственной деятельности - обеспечить организацию системного пространственно-производственного цифрового планирования и создания в концепте «Морская акватория – Приморская территория» специализированных производств безотходной переработки и доставки потребителю высококачественной продукции на основе ВБР с минимальными транзакционными издержками. Модели региональных цифровых сетей в рыбной отрасли могут найти широкое применение в странах, имеющих выходы к Океану, в первую очередь, - в странах БРИКС.

Работа выполнена в соответствии с утвержденным Федеральным агентством по рыболовству тематическим планом прикладных научных исследований, выполняемых коллективом университета в 2020 году, в рамках тематик: «Разработка рекомендаций по переходу рыбной отрасли к платформенной экономике» и «Исследование прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения в условиях поточного производства предприятий рыбохозяйственного комплекса».

Литература

1. Rusu E и Soares C G 2011 Wave modelling at the entrance of ports Ocean Eng. 38 2089–109
2. Собрание законодательства Российской Федерации. 2019 Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 28 октября 2019 № 2553-р// Собрание законодательства Российской Федерации, N 44, 04.11.2019, ст.6258 (Правительство РФ)
3. Hajkowicz S 2015 Global megatrends: Seven patterns of change shaping our future (CSIRO PUBLISHING)
4. Cole M B, Augustin M A, Robertson M J и Manners J M 2018 The science of food security. npj Science of Food, 2, 14
5. Российская газета 2006 Федеральный закон от 10.01.2006 N 16-ФЗ (ред. от 29.07.2018) «Об Особой экономической зоне в Калининградской области и о внесении изменений в некоторые законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета, N 8, 19.01.2006 (Москва)
6. Российская газета 2018 Федеральный закон от 03.08.2018 г. N 291-ФЗ «О специальных административных районах на территориях Калининградской области и Приморского края» // Российская газета, N 170, 06.08.2018 (Москва)
7. Министерстве экономического развития 2020 Сводные показатели Реестра резидентов ОЭЗ в Калининградской области Министерство экономического развития, промышленности и торговли Калининградской области
8. Polyakov R и Stepanova T 2020 Innovation Clusters in the Digital Economy Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities ред S Ashmarina, A Mesquita и M Vochozka (Cham: Springer International Publishing) cc 200–15
9. Polyakov K. R 2017 Fisheries cluster of the Kaliningrad region - the missing mechanism and a link in the industry Fishery 4 42–7

10. Волкогон В А 2019 Подготовка профессиональных кадров для рыбной отрасли в условиях цифровизации экономики Морские интеллектуальные технологии 4 154–60
11. Майтаков Ф Г и Яфасов А Я 2020 Концепция цифровой платформы региональной системы персонального питания Морские интеллектуальные технологии 176–85
12. Н.Валуцкий, Винарова С, Егоров Г и др. 2020 Аналитический отчет для Минпромторга России (ИАА «ПортНьюс»)
13. Бутов А М 2018 Рынок продукции судостроения Национальный исследовательский университет, Высшая школа экономики
14. OECD 2017 Imbalances in the shipbuilding industry and assessment of policy responses 6
15. Maitakov F G, Merkulov A A, Petrenko E V и Yafasov A Y 2019 A universal model of a subject area for situational centers τ 947 (Springer International Publishing)
16. Maitakov F G, Merkulov A A, Petrenko E V и Yafasov A Y 2019 Development of decision support systems for smart cities τ 947 (Springer International Publishing)
17. Яфасов А Я, Майтаков Ф Г и Петренко Е В 2020 Региональная система организации и управления подготовкой кадров для распределенной сети производителей в рыбной отрасли Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки 17–21
18. Кострикова Н А, Майтаков Ф Г и Яфасов А Я 2019 Современные тренды цифровизации экономики и перспективы их использования в морской индустрии на примере рыбохозяйственного комплекса России Морские интеллектуальные технологии 4 126–39
19. Правительствоа РФ 2019 Распоряжение Правительства РФ от 26 ноября 2019 г. № 2798-р. Об утверждении Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по ее реализации (Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 28.11.2019, N 0001201911280005)
20. Правительство РФ 2020 Распоряжение Правительства РФ от 12.04.2020 N 993-р. Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года. (Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 15.04.2020, N 0001202004150003)
21. Морская коллегия 2018 Протокол совещания Морской коллегии от 28 апреля 2018 г. №1 (29) Морская коллегия
22. Engelke P 2018 Three Ways the Fourth Industrial Revolution Is Shaping Geopolitics World Econ. Forum
23. Правительства РФ 2016 Постановление Правительства РФ от 18.04.2016 N 317. О реализации Национальной технологической инициативы (с изменениями на 24 июля 2020 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2020 года) (Правительство РФ)

References

1. Rusu E and Soares C G 2011 Wave modeling at the entrance of ports Ocean Eng. 38 2089-109
2. Collected Legislation of the Russian Federation. 2019 On approval of the Strategy for the development of the shipbuilding industry for the period up to 2035: Order of the Government of the Russian Federation of October 28, 2019 No. 2553-г // Collected Legislation of the Russian Federation, No. 44, 04.11.2019, Article 6258 (Government of the Russian Federation)
3. Hajkowicz S 2015 Global megatrends: Seven patterns of change shaping our future (CSIRO PUBLISHING)
4. Cole M B, Augustin M A, Robertson M J and Manners J M 2018 The science of food security. npj Science of Food, 2, 14
5. Rossiyskaya Gazeta 2006 Federal Law of 10.01.2006 N 16-FZ (as amended on 29.07.2018) "On the Special Economic Zone in the Kaliningrad Region and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" // Rossiyskaya Gazeta, N 8 , 19.01.2006 (Moscow)
6. Rossiyskaya Gazeta 2018 Federal Law of 03.08.2018 N 291-FZ "On Special Administrative Regions in the Kaliningrad Region and Primorsky Krai" // Rossiyskaya Gazeta, N 170, 06.08.2018 (Moscow)
7. Ministry of Economic Development 2020 Aggregate Indicators of the Register of SEZ Residents in the Kaliningrad Region Ministry of Economic Development, Industry and Trade of the Kaliningrad Region
8. Polyakov R and Stepanova T 2020 Innovation Clusters in the Digital Economy Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities edited by S Ashmarina, A Mesquita and M Vochozka (Cham: Springer International Publishing) pp 200-15
9. Polyakov K. R 2017 Fisheries cluster of the Kaliningrad region - the missing mechanism and a link in the industry Fishery 4 42–7
10. Volkogon VA 2019 Professional training for the fishing industry in the context of digitalization of the economy Marine intelligent technologies 4 154-60
11. Maitakov FG and Yafasov A Ya 2020 Concept of a digital platform for a regional personal catering system Marine intelligent technologies 176–85
12. N. Valuisky, Vinarova S, Egorov G et al. 2020 Analytical report for the Ministry of Industry and Trade of Russia (IAA PortNews)
13. Butov AM 2018 Market of shipbuilding products National Research University, Higher School of Economics
14. OECD 2017 Imbalances in the shipbuilding industry and assessment of policy responses 6
15. Maitakov F G, Merkulov A A, Petrenko E V and Yafasov A Y 2019 A universal model of a subject area for situational centers τ 947 (Springer International Publishing)
16. Maitakov F G, Merkulov A A, Petrenko E V and Yafasov A Y 2019 Development of decision support systems for smart cities τ 947 (Springer International Publishing)

17. Yafasov A Ya, Maitakov FG and Petrenko E V 2020 Regional system of organization and management of personnel training for a distributed network of producers in the fishing industry Bulletin of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet: Psychological and Pedagogical Sciences 17–21
18. Kostrikova NA, Maitakov FG and Yafasov A Ya 2019 Modern trends in the digitalization of the economy and prospects for their use in the marine industry on the example of the fishery complex of Russia Marine intelligent technologies 4 126–39
19. Government of the Russian Federation 2019 Order of the Government of the Russian Federation of November 26, 2019 No. 2798-r. On the approval of the Strategy for the development of the fishery sector of the Russian Federation for the period up to 2030 and an action plan for its implementation (Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru, 28.11.2019, N 0001201911280005)
20. Government of the Russian Federation 2020 Order of the Government of the Russian Federation of 12.04.2020 N 993-r. On the approval of the Strategy for the development of the agro-industrial and fishery complexes of the Russian Federation for the period up to 2030. (Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru, 15.04.2020, N 0001202004150003)
21. Marine Board 2018 Minutes of the meeting of the Marine Board dated April 28, 2018 No. 1 (29) Marine Board
22. Engelke P 2018 Three Ways the Fourth Industrial Revolution Is Shaping Geopolitics World Econ. Forum
23. Government of the Russian Federation 2016 Resolution of the Government of the Russian Federation of April 18, 2016 N 317. On the implementation of the National Technology Initiative (as amended on July 24, 2020) (as amended on September 1, 2020) (Russian Government)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Абдурашид Яруллаевич Яфасов, доктор технических наук, начальник управления инновационной деятельностью, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: yafasov@list.ru

Abdurashid Y. Yafasov, Dr. Sci. (Eng), Head of Innovation Management, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: yafasov@list.ru

Руслан Константинович Поляков, кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательской деятельности, Калининградский государственный технический университет 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Ruslan K. Polyakov, Ph.D. (Econ), Associate Professor, the Head of Department of Scientific Research, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Прогнозирование электропотребления объектов социально-экономических систем на основе значений ранговой нормы

В.И. Гнатюк¹, О.Р. Кивчун², Д.Г. Морозов³

¹Калининградский государственный технический университет

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта

³Калининградский инновационный центр «Техноценоз»

Аннотация. Авторами предлагается алгоритм прогнозирования электропотребления объектов социально-экономических систем на основе значений ранговых норм. В его основу положено понятие ранговой нормы, представляющей собой неотрицательный функционал, заданный в векторном ранговом пространстве и обобщающий понятие длины вектора или абсолютного значения параметра. Основными этапами алгоритма являются: импорт данных по электропотреблению, расчёт ранговых норм, прогнозирование значений ранговых норм и исходных значений электропотребления, восстановление прогнозных значений ранговых норм, сравнение результатов прогнозирования и выбор наилучшего прогноза. Экспериментальная проверка алгоритма была реализована на данных по электропотреблению регионов Российской Федерации. Анализ результатов прогнозов позволил определить, что средние относительные и абсолютные ошибки метода прогнозирования на основе значений ранговых норм, меньше. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что для среднесрочного прогнозирования целесообразнее использовать метод на основе значений ранговых норм.

Ключевые слова: прогнозирование, электропотребление, социально-экономическая система, ранговая норма, регион, векторный ранговый анализ, цифровая энергетика.

Electric consumption predictions objects of socio-economic systems based on the ranked values

Victor I. Gnatyuk¹, Oleg R. Kivchun², Dmitry G. Morozov³

¹Kaliningrad State Technical University

²Baltic Federal University I. Kant

³Kaliningrad Innovation Center Technocenosis LLC

Abstract. The authors propose an algorithm for predicting the power consumption of objects of socio-economic systems based on the values of rank norms. It is based on the concept of a rank norm, which is a non-negative functional specified in a vector rank space and generalizing the concept of the length of a vector or the absolute value of a parameter. The main stages of the algorithm are: importing data on power consumption, calculating rank norms, predicting the values of rank norms and initial values of power consumption, restoring the predicted values of rank norms, comparing forecast results and choosing the best forecast. Experimental verification of the algorithm was carried out on data on power consumption of the regions of the Russian Federation. Analysis of the forecast results allowed us to determine that the average relative and absolute errors of the forecasting method based on the values of rank norms are less. This fact allows us to conclude that it is more expedient to use the method based on the values of rank norms for medium-term forecasting.

Key words: forecasting, power consumption, socio-economic system, rank norm, region, vector rank analysis, digital energy.

Введение

Для исследования любой социально-экономической системы (СЭС) всегда важен анализ её состояния и перспектив развития. Это позволяет учесть закономерности для реализации прогноза важных политических, экономических и экологических показателей. В свою очередь результаты прогноза играют важную роль в принятии стратегических управленческих решений.

При рассмотрении региона как СЭС следует обратить внимание на то, что все его элементы функционируют во внешней среде и подвержены влиянию изменений и случайных факторов. В связи с этим разработано достаточно большое количество методов и методологий, позволяющих на разных уровнях управления обеспечить прогнозирование, планирование, распределение ресурсов и стимулирование.

В настоящее время на территории Российской Федерации активно осуществляется переход к цифровой экономике. Одним из направлений данного перехода является развитие цифровой энергетики. Смыслом внедрения цифровой

энергетики для регионов является преобразование производственных, экономических и иных отношений в сфере производства, передачи, а также потребления энергии на основе новейших цифровых подходов и средств автоматизации [1-4].

Концепция цифровой энергетики, представленная Д.В. Холкиным в [5], позволяет понять, что в регионах необходимо внедрять новую площадку взаимодействия экономических субъектов, на основе цифровой платформы управления производством, передачей и потреблением электроэнергии. Для этого необходимы методики описывающие процессы функционирования потребителей энергии, их отношений между собой, а также взаимодействия с региональной энергосистемой. Особое внимание при разработке данных методик следует уделить процедуре прогнозирования электропотребления.

1. Алгоритм прогнозирования электропотребления объектов региона на основе значений ранговой нормы

В настоящее время существует большое количество методов и методик прогнозирования

электропотребления. Анализ достаточно большого количества научных трудов в данной области позволил заключить, что в нашей стране при прогнозировании электропотребления используют программно-аппаратный комплекс «Энергостат», методы, разработанные Н.Э. Голяндиной, Б.И. Макоклюевым, А.С. Поилжаровым, А.А. Басов, Ю.Э. Алла, С.В. Локтионовым и др. учёными. За рубежом перспективные исследования в области прогнозирования проводят К. Patterson, Н. Hassani, S. Heravi, A. Zhigljavsky, F. Ruch, D. Bester и др.

Однако особый интерес при прогнозировании электропотребления вызывают техноценологические методы, основанные на ранговом анализе больших технических систем [6-8]. Основателем данного направления является профессор Б.И. Кудрин [9]. Он впервые ввёл понятие техноценоза и создал техноценологическую теорию для исследования сложных систем. В результате анализа работ его учеников В.И. Гнатука, В.В. Фуфаева, Б.В. Жилина, Д.В. Луценко, А.В. Мозгалина, Ю.В. Матюниной, А.С. Исаева установлено, что техноценологические методы дают значительно лучшие результаты прогноза, чем остальные методы, основанные на классической математической статистике.

В дополнения к данным методам на основе теории векторного рангового анализа был разработан алгоритм прогнозирования электропотребления на основе значений ранговой нормы (рис.1).

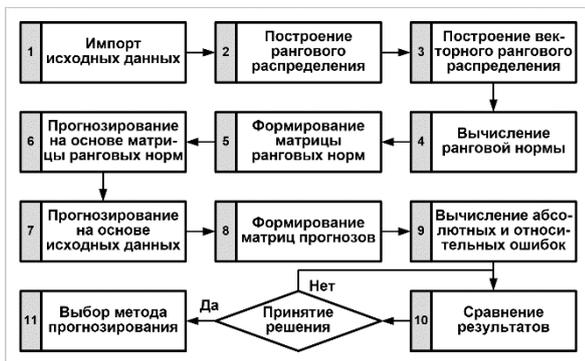


Рис. 1. Структура алгоритма прогнозирования электропотребления на основе ранговой нормы:

На первом этапе алгоритма осуществляется импорт исходных данных по электропотреблению, а также их сортировка и верификация. Далее формируется ранговое табулированное распределение, которое на следующем этапе представляется в векторном ранговом пространстве (рис. 2). В [10] полное определение векторного рангового пространства.

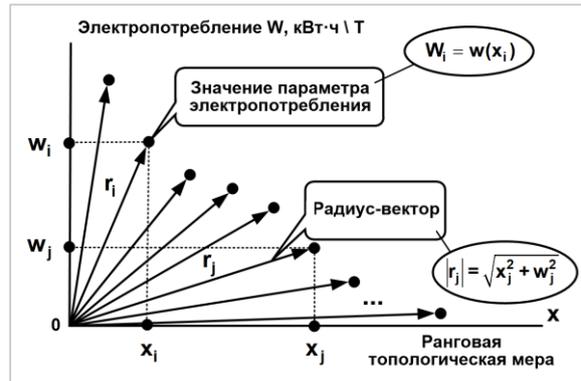


Рис.2. Представление рангового параметрического распределения в векторном ранговом пространстве

Затем осуществляется расчёт значений ранговой нормы. «Ранговая норма – представляет собой неотрицательный функционал, заданный в векторном ранговом пространстве и обобщающий понятие длины вектора или абсолютного значения параметра». Данный показатель, например, для вектора r_j^a (рис. 3) вычисляется по следующему выражению:

$$|r_j^a| = \sqrt{(x_j^a)^2 + (W_j^a)^2}; r_j^a \in VR. \quad (1)$$

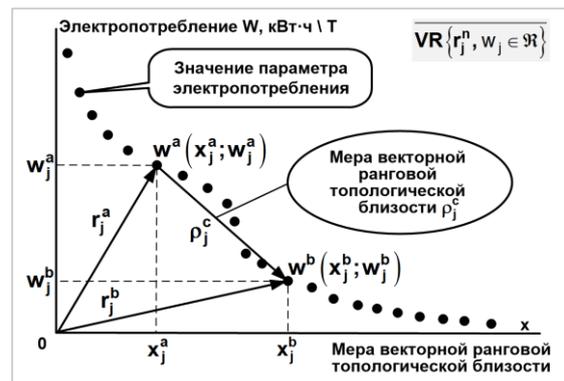


Рис. 3. Графическое отображение ранговой нормы

Далее формируется матрица значений ранговых норм для каждого радиус-вектора векторного рангового распределения (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент матрицы ранговых норм

На основе матрицы ранговых норм далее реализуется прогнозирование техноценологическим методом с фиксированной первой точки. Для этого вычисляются значения ранговых коэффициентов и первых точек. На рисунках 5 и 6 представлены фрагменты графиков аппроксимации динамики ранговых коэффициентов и первых точек.

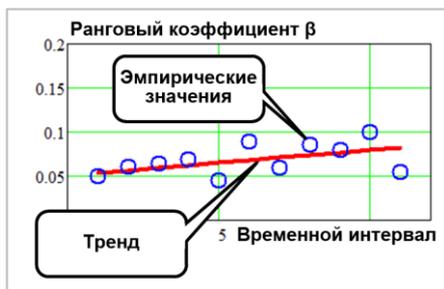


Рис. 5. Фрагмент аппроксимации динамики рангового коэффициента

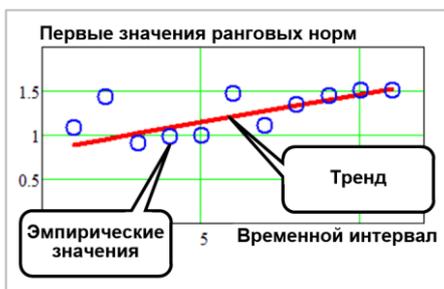


Рис. 6. Фрагмент аппроксимации динамики первых точек

Далее, тем же методом реализуется прогнозирование исходных данных по электропотреблению. Соответственно, по результатам формируются две матрицы прогнозных значений, полученные техноценологическим методом с фиксированной первой точкой и на основе исходных данных по электропотреблению.

Следующим этапом алгоритма является процедура обратного восстановления прогнозных ранговых норм к значениям электропотребления (рис. 7).

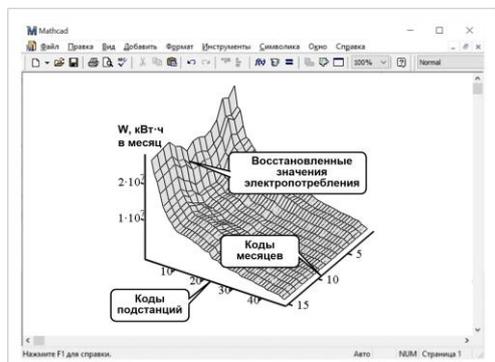


Рис. 7. Ранговая поверхность восстановленных значений электропотребления

В завершении алгоритма рассчитываются абсолютные и относительные ошибки прогноза, осуществляется их анализ и принимается решение о выборе наилучшего метода прогнозирования.

3. Экспериментальная проверка алгоритма прогнозирования электропотребления на основе значений ранговой нормы

В качестве исходных данных для экспериментальной проверки использовались месячные данные по электропотреблению регионов России за одиннадцать лет с 2009 по 2019 год [11]. Данные с 2017 по 2019 года были выделены в качестве проверочных. Таким образом, прогнозирование осуществлялось на выборке с 2009 по 2016 год. Горизонт прогноза составил три года помесячно, т.е. на 2017, 2018 и 2019 года.

По результатам прогнозирования были рассчитаны относительные и абсолютные ошибки прогноза. В таблице 1 представлены сравнительные данные.

Таблица 1

Результат оценки точности по сравнению с 2017, 2018 и 2019 годами

Параметр	Метод прогнозирования с фиксированной первой точки			Метод прогнозирования на основе значений ранговых норм		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
Средняя относительная ошибка, %	7,1	7,9	8,6	4,4	4,9	5,3
Абсолютная ошибка в целом, кВт·ч·10 ⁷	1,75	1,67	1,83	0,55	0,7	1,1

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрен алгоритм прогнозирования электропотребления объектов социально-экономических систем на основе значений ранговых норм. В его основу положено понятие ранговой нормы, представляющей собой неотрицательный функционал, заданный в векторном ранговом пространстве и обобщающий понятие длины вектора или абсолютного значения параметра. Основными этапами алгоритма являются: импорт данных по электропотреблению, расчёт ранговых норм, прогнозирование значений ранговых норм и исходных значений электропотребления, восстановление прогнозных значений ранговых норм, сравнение результатов прогнозирования и выбор наилучшего прогноза.

Из анализа результатов экспериментальной проверки, представленных в таблице 1 видно, что средние относительные и абсолютные ошибки метода прогнозирования на основе значений ранговых норм, меньше. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что для среднесрочного прогнозирования по месячным данным целесообразнее использовать метод на основе значений ранговых норм.

Литература

1. Холкин Д.В. Люди цифры. Шесть взглядов на новую энергетику [Монография] / Д.В. Холкин. – М.: [Литагент Ридер], [2020]. – 220 с.
2. Morkovkin D.E., Gibadullin A.A., Romanova Ju.A., Erygin Yu.V., Ziadullaev Ul.S. Formation of a national environmental strategy for the fuel and energy complex // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537 (2019). Pp. 042064.

3. Morkovkin D E, Lopatkin D S, Shushunova T N, Sharipov B K, Gibadullin AA. Formation of the conditions for the development of innovation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. № 1515. Pp. 032002. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032002.
4. Gibadullin A.A. Assessment of the level of stability and reliability of the electric power complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. № 837 (2020). Pp. 012007. DOI:10.1088/1757-899X/837/1/012007.
5. Гнатюк В.И. Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению. Калининград: Техноценоз, 2020. URL: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (дата обращения: 08.06.2020).
6. Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В., Цырук С.А. Реализация стратегии снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа // Морские интеллектуальные технологии. М.: МОРИНТЕХ. 2019. № 4 (46), т. 4. С. 139-145.
7. Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Никитин М.А., Луценко Д.В. Модели и методы прогнозирования электропотребления при управлении объектами регионального электротехнического комплекса // Математическое моделирование. 2017. № 29: 5. С. 109-121.
8. Gnatyuk V.I., Polevoy S. A., Kivchun O. R., Lutsenko D. V. Applying the potentiating procedure for optimal management of power consumption of technocenose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 837. Advanced technologies in the fuel and energy complex (Scopus). M., 2020. Doi:10.1088/1757-899X/837/1/012001.
9. Кудрин Б.И. Электроэнергетика сегодня и проблемы электрообеспечения потребителей // Промышленная энергетика. 2016. № 10. С. 5-9.
10. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ [Трактат] / О.Р. Кивчун. – Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
11. Электроэнергетический баланс Российской Федерации // Росстат. [2020]. Дата обращения: 25.08.2020. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 25.08.2020).

References

1. Xolkin D.V. Lyudi cifry`. Shest` vzglyadov na novuyu e`nergetiku [People are figures. Six views on new energy]: Monografiya/ D.V. Xolkin. – М.: [Litagent Ridero], [2020]. – 220 s.
2. Morkovkin D.E., Gibadullin A.A., Romanova Ju.A., Erygin Yu.V., Ziadullaev Ul.S. Formation of a national environmental strategy for the fuel and energy complex // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 537 (2019). Pp. 042064.
3. Morkovkin D E, Lopatkin D S, Shushunova T N, Sharipov B K, Gibadullin AA. Formation of the conditions for the development of innovation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. № 1515. Pp. 032002. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032002.
4. Gibadullin A.A. Assessment of the level of stability and reliability of the electric power complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. № 837 (2020). Pp. 012007. DOI:10.1088/1757-899X/837/1/012007.
5. Gnatyuk V.I. Cifrovoj dvojn timer technocenoza po e`lektropotrebleniyu [The digital twin of the technocenosis in terms of energy consumption]. Kaliningrad: Technocenoz, 2020. URL: <http://gnatukvi.ru/knig.htm> (data obrashheniya: 08.06.2020).
6. Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Lucenko D.V., Cyruk S.A. Realizaciya strategii snizheniya e`lektropotrebleniya ob`ektov priportovogo e`lektrotehnicheskogo kompleksa na osnove vektornogo rangovogo analiza [Implementation of the strategy for reducing the power consumption of the objects of the port electrical complex based on vector rank analysis] // Morskije intellektual`ny`e tehnologij. M.: MORINTEX. 2019. № 4 (46), t. 4. S. 139-145.
7. Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Nikitin M.A., Lucenko D.V. Modeli i metody` prognozirovaniya e`lektropotrebleniya pri upravlenii ob`ektami regional`nogo e`lektrotehnicheskogo kompleksa [Models and methods for forecasting power consumption in the management of objects of the regional electrical complex] // Matematicheskoe modelirovanie. 2017. № 29: 5. S. 109-121.
8. Gnatyuk V.I., Polevoy S. A., Kivchun O. R., Lutsenko D. V. Applying the potentiating procedure for optimal management of power consumption of technocenose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 837. Advanced technologies in the fuel and energy complex (Scopus). M., 2020. Doi:10.1088/1757-899X/837/1/012001.
9. Kudrin B.I. E`lektroe`nergetika segodnya i problemy` e`lektroobespecheniya potrebitelej [Electric power industry today and problems of electricity supply to consumers] // Promy`shlennaya e`ner-getika. 2016. № 10. S. 5-9.
10. Kivchun O.R. Vektorny`j rangovy`j analiz [Vector rank analysis]: Traktat / O.R. Kivchun. – Pervoe izdanie. – E`lektronny`e tekstovy`e danny`e. – Kaliningrad: [Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Technocenoz»], [2019]. – Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.
11. E`lektroe`nergeticheskij balans Rossijskoj Federacii [Electricity balance of the Russian Federation] // Rosstat. [2020]. Data obrashheniya: 25.08.2020. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (data obrashheniya: 25.08.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Иванович Гнатыук, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: mail@gnatukvi.ru

Олег Романович Кивчун, кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций института физико-математических наук и информационных технологий,

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, 236016, Калининград, ул. Невского, д. 14, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Дмитрий Геннадьевич Морозов, научный сотрудник Калининградского инновационного центра «Техноценоз», 236000, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: morozov@dmitry.by

Victor I. Gnatyuk, Dr. Sci. (Eng), Professor, professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg R. Kivchun, Ph.D. (Eng), Associate Professor of the Department of Telecommunications of the Institute Physical and mathematical sciences and information technologies,

Baltic Federal University I. Kant, 236016, Kaliningrad, ul. Nevsky, d. 14, e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Dmitry G. Morozov, Researcher, Kaliningrad Innovation Center «Tekhno-tsenoz», 236000, Kaliningrad, Sovetsky prospect, 1, e-mail: morozov@dmitry.by

УДК 612.886+616.07

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.080

Управление устойчивостью будущих морских специалистов к укачиваниюА.А. Зайцев¹, А.А. Зайцева¹, Н.К. Полещук²¹Калининградский государственный технический университет, ²Военная академия воздушно - космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова

Аннотация. В статье приводится обоснование условий тренировки устойчивости к укачиванию будущих морских специалистов, способствующих снижению объемов нагрузки в специальных упражнениях и временных затрат на цикл подготовки. Предложен способ расчета перегрузок в упражнениях, применяемых в активной, пассивной и смешанной тренировках устойчивости к укачиванию. Значение критерия определяется путем вычисления отношения полного ускорения, действующего на вестибулярный анализатор в процессе движения, к ускорению свободного падения. Установлено, что ведущей теорией для отбора средств тренировки является теория сенсорного конфликта. Дается описание и обоснование применения авторских разработок для тренировки статического и динамического равновесия на возвышенной, наклонной, качающейся и соскальзывающей опорах, моделирующих условия сохранения статокINETической устойчивости в морских условиях. Предложен необходимый и достаточный комплекс технических устройств и тренажеров для управления устойчивостью будущих морских специалистов к укачиванию.

Ключевые слова: морские специалисты, укачивание, морская болезнь, статокINETическая устойчивость, равновесие, прикладная физическая подготовка, сенсорный конфликт, технические устройства.

Managing the resilience of future marine specialists to sicknessAnatoly A. Zaitsev¹, Aleksandra A. Zaitseva¹, Nadegda K. Poleshchuk²¹Kaliningrad State Technical University, ²Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukova

Abstract. The article substantiates the conditions of resistance to motion sickness of future marine specialists, the possibilities of the system for measuring the load in special exercises and the time spent on the training cycle. A method for calculating overloads in exercises used in active, passive and mixed trainings of resistance to motion sickness is proposed. The value is determined by calculating the ratio of the total acceleration acting on the vestibular analyzer during the acceleration of gravity. It has been established that the leading theory for the selection of training means is the theory of sensory conflict. A description and justification of the use of author's developments for training static and dynamic balance on an elevated, inclined, swinging and sliding support, simulating the conditions for maintaining statokINETIC stability in marine conditions, is given. The necessity and a sufficient set of technical devices and simulators for the sustainable development of marine specialists for motion sickness is proposed.

Key words: marine specialists, motion sickness, motion sickness, statokINETIC stability, balance, applied physical training, sensory conflict, technical devices

Введение

Особенность современного этапа мореплавания состоит в том, что его развитие идет в нескольких направлениях:

Во-первых, совершенствуются мореходные качества судов (транспортных, рыболовных, торговых и других флотов), таких как заливаемость, остойчивость, управляемость, скорость хода. Параллельно меняются критерии и показатели отбора экипажа и персонала способных адаптироваться к условиям плавания, на выбранном судне.

Во-вторых, совершенствуется среда на круизных туристических судах (малых, средних, больших, суперлайнерах) в целях снижения влияния качки на организм. Каюты туристов располагаются ближе к центру судна, используются различные успокоители качки. Проблему «морской болезни» если появились ее признаки на таких судах решают медикаментозными средствами (таблетки от укачивания).

В-третьих, осуществляется подготовка и отбор специалистов морского флота посредством «оморячивания» при прохождении морской практики на учебно-парусных судах.

Несмотря на многообразие подходов к снижению влияния качки на организм проблема ее

профилактики остается и на сегодняшний день актуальной.

Анализ квалификационных требований к выпускнику морского вуза показывает, что важнейшим условием эффективности его деятельности является способность противостоять воздействию специфическим факторам судовой среды, особенно к действию инерционных сил при передвижении. Низкая устойчивость к укачиванию приводит к снижению работоспособности и нарушению многих двигательных действий, связанных с выполнением служебных обязанностей.

Исследования последних лет свидетельствуют о снижении у студенческой молодежи уровня психофизиологической подготовленности, в том числе и способности противостоять воздействию различного рода ускорений и сочетанному воздействию ускорений и раздражителей других сенсорных систем. С другой стороны, в педагогическом сообществе сформировалось мнение, что тренировка устойчивости к укачиванию требует значительных временных затрат и усилий, специального оборудования.

Целью исследования стало определение условий эффективного управления процессом формирования устойчивостью к укачиванию будущих морских специалистов.

1. Расчет вестибулярной нагрузки

Теоретический анализ и обобщение данных исследований в области физиологии и психофизиологии морского труда выявил основные показатели влияния различного рода качки судна на функциональное состояние морских специалистов. Установлено, что на возникновение скрытых и выраженных форм «морской болезни» влияют величина, время и направление действия линейных, угловых и комбинированных ускорений, определяющих величину нагрузки на вестибулярную функциональную систему.

Характеристика нагрузки по каждому из выделенных параметров, с одной стороны, допускает применить дифференцированный подход к выбору специальных упражнений, а с другой стороны, не позволяет интегрально оценить действие всех факторов в совокупности. Поэтому возникла необходимость разработки критерия величины нагрузки на человека, находящегося на судне, учитывающего показатели движения судна при бортовой, килевой, вертикальной качке и поворотах в горизонтальной плоскости, а также перемещения головы (вестибулярного аппарата) человека в различных плоскостях (горизонтальной, фронтальной и сагиттальной) и вдоль вертикальной и горизонтальной осей. Разработка такого критерия позволяет все показатели привести к безразмерной величине, характеризующей суммарную вестибулярную нагрузку.

«...Для вывода общей формулы расчета вестибулярной нагрузки, установим две системы координат. Первая - подвижная GXYZ имеет начало (G) в центре тяжести головы. Ось GX направлена в сторону лица, т.е. вперед; ось GY влево; ось GZ вверх к темени. ...Вторая система координат (неподвижная) Oξ α ζ, сохраняет свое положение в пространстве при любых перемещениях подвижной системы» [2]. (рис.1).

Величина ускорений, действующих на лабиринты, рассчитывается по формулам (1):

$$\begin{aligned} W_x &= \ddot{\xi} + z\ddot{\psi} - y\ddot{\phi} + (\dot{\phi}^2 + \dot{\psi}^2)x - \dot{\phi}(\dot{\psi}y + \dot{\phi}z) + 2(\dot{z}\dot{\psi} - \dot{y}\dot{\phi}), \\ W_y &= \ddot{\alpha} + x\ddot{\phi} - z\ddot{\theta} + (\dot{\phi}^2 + \dot{\theta}^2)y - \dot{\psi}(\dot{\theta}z + \dot{\phi}x) + 2(\dot{x}\dot{\phi} - \dot{z}\dot{\theta}), \\ W_z &= \ddot{\zeta} + y\ddot{\theta} - x\ddot{\psi} + (\dot{\psi}^2 + \dot{\theta}^2)z - \dot{\phi}(\dot{\theta}x + \dot{\psi}z) + 2(\dot{y}\dot{\theta} - \dot{x}\dot{\psi}) + g. \end{aligned} \quad (1)$$

По правилу геометрического сложения проекций вектора на прямоугольные оси координат абсолютная величина полного ускорения будет равна:

$$W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}. \quad (2)$$

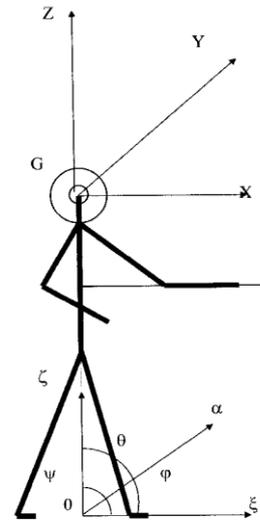


Рис. 1. Системы координат для характеристики вестибулярной нагрузки

ψ - угол наклона в сагиттальной плоскости (вперед - назад), (рад); θ - угол наклона во фронтальной плоскости (влево - вправо), (рад); ϕ - угол поворота в горизонтальной плоскости (налево - направо), (рад); ξ - смещение в направлении вверх - вниз (м); α - смещение в направлении влево - вправо (м); ζ - смещение в направлении вперед - назад (м); x, y, z - изменение координат вестибулярного анализатора в системе координат GXYZ (подвижной) (м).

Перегрузка определяется как отношение полного ускорения к ускорению свободного падения.

$$\eta = \frac{\sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2}}{g}. \quad (3)$$

На основе приведенных формул и анализа изменения состояния занимающихся на специальных тренажерах и после выполнения вестибулярных проб, моделирующих разные нагрузки, показатели η были классифицированы как «перегрузки» ($\eta > 1,15$), «недогрузки» ($\eta < 0,85$) и нейтральные ($0,85 < \eta < 1,15$).

Таким образом, определено первое условие управления тренировкой устойчивостью к качиванию – подбор упражнений, моделирующих различные нагрузки при морском качивании по направленности и величине.

2. Активные тренировки устойчивости к качиванию

Одним из перспективных направлений, как было доказано в работах В.Г. Стрельца, К.Л.Хилова, А.И. Яроцкого и др. является использование упражнений активизирующих вестибулярную систему в целях диагностики, отбора и тренировки человека к воздействию различного рода ускорений [5,6,9].

В практику введен термин «вестибулярная подготовка» - «... комплекс мероприятий, направленных на повышение устойчивости»

вестибулярного анализатора в составе функциональной системы анализаторов пространственной ориентировки в интересах профилактики болезни движения» [1].

В космической отрасли (с января 1962 года) была разработана и внедрена система исследования (отбор) и тренировки устойчивости к укачиванию, которая носила разнообразный характер и основывалась на представлениях о причинах возникновения укачивания и включала воздействия на афферентные системы, контролирурующие положение тела в пространстве – угловые ускорения, оптокинетические раздражения, сохранение равновесия на неустойчивой опоре.

Проведение широкомасштабных исследований по изучению развития состояния укачивания на сочетанные раздражения отделов вестибулярной системы и нескольких сенсорных систем привело к появлению теории сенсорного конфликта, объясняющей возникновение укачивания несовпадением имеющейся модели этого состояния в центральной нервной системе с реальным состоянием активности ее отделов под воздействием различных раздражителей.

Л.А. Китаевым-Смыком были выделены три вида сенсорных конфликтов: внутрианализаторный, межанализаторный и наданализаторный. Такое разделение позволило разработать группы упражнений для тренировки устойчивости к укачиванию [4].

Например, для моделирования внутрианализаторного вестибулярного конфликта рекомендуется выполнять наклоны головы вперед-назад, в стороны или повороты в стороны при ходьбе или беге, при поворотах вокруг вертикальной оси. Для моделирования зрительно-вестибулярного конфликта рекомендуется выполнять специальные упражнения для тренировки вестибулярного анализатора с закрытыми глазами или светонепроницаемой повязкой на глазах.

Итак, вторым условием управления тренировкой устойчивостью к укачиванию является применение упражнений, моделирующих различные виды сенсорных конфликтов.

3. Комплекс технических устройств и тренажеров для тренировки устойчивости к укачиванию

«... Любую работу на судне всегда труднее выполнять в условиях качки и тем более в шторм. Становится сложнее и опаснее передвигаться по судну, особенно на открытых палубах, в помещениях, насыщенных оборудованием, через дверные проемы и по трапам. Большое количество несчастных случаев приходится на зимние месяцы, т.е. на время года, когда свирепствуют штормы...» [7].

К опасным и трудным работам на рыбопромысловых судах относят - «... швартовые и грузовые операции в открытом море, передачу грузов в судна, на судно или на плавбазу в условиях качки, спуск и подъем трала и другие работы, выполнение которых требует значительного напряжения физических и психических сил в условиях неустойчивой опоры...» [2].

Одним из направлений совершенствования методики профессионально-прикладной физической подготовки морских специалистов является применение специальных технических устройств,

способствующих формированию статокинетической устойчивости.

Статокинетическая устойчивость обеспечивается в большей степени взаимодействием проприоцептивной, зрительной, тактильной и вестибулярной систем.

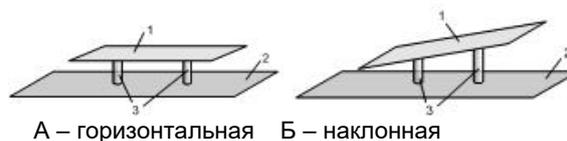
Вестибулярная система (ВС) — полимодальная организация, объединяющая множество функций, направленных на обеспечение организма пространственным комфортом. Конкретное участие ВС обуславливается ее периферическим и центральным отделами. ВС периферическая (отолитовая подсистема, полукружные каналы) фиксирует изменения положения головы, линейные и угловые ускорения. ВС центральная (вестибулярные ядра, вестибулярные отделы мозжечка, двухсторонние связи) ответственна за контроль позы и проявление вестибулярных рефлексов при управлении движениями.

На основе совместного функционирования периферической и центральной подсистем ВС равновесие осуществляется рефлекторно без особого участия в нем сознания. Статокинетические рефлексы обеспечивают адекватное взаиморасположение конечностей, а также устойчивую ориентацию тела в пространстве.

В этой связи правомерно суждение: аттестация и тренировка ВС относятся к числу важнейших целей профессионально-прикладной физической подготовки морских специалистов. Для того чтобы процедуры аттестации ВС отвечали требованиям надежности, их осуществление должно идти в двух взаимодополняющих и процессуально отличных направлениях [3]:

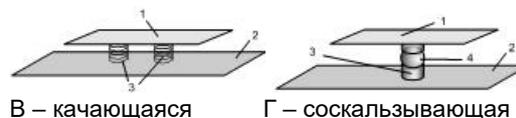
- активация ВС посредством выполнения упражнений на всевозможных видах опоры, моделирующих условия сохранения равновесия в различных видах двигательной деятельности;
- активация ВС посредством применения упражнений и технических устройств моделирующих угловые, линейные и комбинированные ускорения.

При нахождении на судне морской специалист вынужден сохранять равновесие на возвышенной, наклонной, качающейся и соскальзывающей видах опоры. Для тренировки устойчивости на этих опорах были разработаны технические устройства, представленные на рис.2 и 3.



А – горизонтальная Б – наклонная

Рис.2. Неподвижные платформы для тренировки статического равновесия



В – качающаяся Г – соскальзывающая

Рис.3. Подвижные платформы для тренировки динамического равновесия

Активация ВС посредством применения упражнений и технических устройств моделирующих угловые, линейные и комбинированные ускорения является вторым направлением аттестации и тренировки устойчивости человека к укачиванию. Важнейшим условием создания таких устройств является возможность моделирования различных видов сенсорного конфликта. К таким специальным тренажерам следует отнести нижеперечисленные устройства.

1. «Качающаяся палуба» (рис.4). Период колебаний составляет от 1 до 7 с. Суть тренировки – развитие способности человека противостоять сочетанному воздействию «перегрузок» ($\eta > 1$) и «недогрузок» ($\eta < 1$). Занимающиеся могут находиться на платформе в различных исходных положениях неподвижно (сидя, лежа; лицом или боком по направлению движения), а также активно раскачивать платформу стоя, сохраняя при этом равновесие. Оптимальное время работы на тренажере 7-10 мин.



Рис.4. «Качающаяся палуба»

2. «Вертикаль» (рис.5). Стержень (30 см) с двухзаходной резьбой, по которому свободно перемещается гайка с ручками. Занимающийся взявшись за ручки тренажера делает вис и начинает вращение. Задание выполняется с закрытыми глазами или светонепроницаемой повязкой. На тренажере моделируется внутривестибулярный конфликт в условиях перегрузок. Варьирование нагрузки осуществляется изменением положений головы, т.е. наклон вперед, назад.

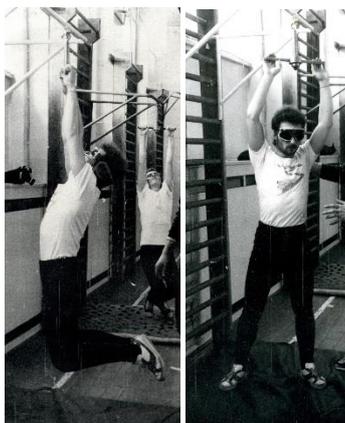


Рис.5. Тренажер «Вертикаль»

3. «Многостепенный вращающийся стол» (рис.6). На стойке, оканчивающейся шаровым шарниром крепится доска с ручками для рук и упоры для стоп. На столе можно моделировать качку в сагиттальной и фронтальной плоскостях, «рыскание» и вращение

в горизонтальной плоскости. Имеется возможность комбинирования двух и более нагрузок.

Стенд может применяться для тренировки тонкой координации движений при изменении углов наклона горизонтальной поверхности. Задача занимающегося путем перемещения центра тяжести вывести доску, на которой он расположен, в горизонтальную плоскость и удерживать это положение в течение одной-двух минут. Второй способ тренировки состоит в воздействии на занимающегося сочетанных нагрузок (например, вращение в горизонтальной плоскости и при одновременном качании во фронтальной плоскости) с задачей удержаться на стенде в течение одной минуты.



Рис.6. Тренажер «Многостепенный вращающийся стол»

После выработки навыка при зрительном контроле, производится усложнение тренировки при помощи закрывания глаз. Вестибулярная нагрузка характеризуется вариативностью («недогрузками» и «перегрузками»)

4. «Подвесная вращающаяся и качающаяся скамейка» (рис.7). К потолку в спортивном зале крепится универсальная подвеска (несколько степеней свободы), к ней присоединяются два троса, к которым крепится гимнастическая скамейка. Высота скамейки от пола регулируется в зависимости от решаемых задач.



Рис.7. «Подвесная вращающаяся и качающаяся скамейка»

Занимающийся лежа на скамейке, в процессе ее раскачивания и вращения, перемещается с одного конца к другому. Тренировочная нагрузка – до двух минут при скорости вращения в диапазоне 0,1-0,3 оборота в секунду и периоде колебаний в диапазоне от трех до пяти секунд. При таком режиме тренировки в большей степени $\eta < 1$.

Второй вариант использования скамейки – это подвешивание ее с одного конца, второй находится на полу. Задача пройти по узкой, неустойчивой, качающейся опоре.

5. Эквilibр [8] (рис.8) - тренажер содержит установленную на основании поворотную платформу, выполненную в виде шарового сегмента диаметром около 1 метра. Занимающийся, приняв вертикальную стойку, начинает тренировку, переступая с ноги на ногу. В процессе этих движений в неустойчивой емкости создается скользяще-давящее воздействие, сила и направленность которого переменны и неопределенны, что требует совершения нестереотипных напрягающих движений. В результате физио-функциональная профилактика связочно-мышечного аппарата стопы и голени сводится не только к укреплению, а и к их развитию.

Наряду с локальностью воздействия на опорно-двигательный аппарат работа в тренажере "Эквilibр" стимулирует совершенствование и вестибуломоторики. Достигается это путем "насиленной" активации системы "стопа - вестибулярный аппарат".



Рис. 8. Тренажер «Эквilibр»

Таким образом третьим условием эффективной тренировки устойчивости будущих морских специалистов к укачиванию является применение специальных тренажеров, моделирующих вестибулярные нагрузки и различные варианты сенсорных внутрианализаторных и межанализаторных конфликтов.

Заключение

Проведенный анализ эволюции взглядов ученых на генез «морской болезни» позволяет рекомендовать теорию сенсорного конфликта в качестве методологической базы отбора содержания специальных физических тренировок. Это значит, что существует потребность в изменении не только конструкции специальных тренажеров и технических устройств, комплексов активной и смешанной тренировок вестибулярного анализатора, но и в изменении показателей нагрузки в сторону уменьшения объема и интенсивности применяемых упражнений.

Разработан количественный критерий (η) интерпретации значимости вестибулярной нагрузки повышающий надежность ее оценки. Значение критерия определяется путем вычисления отношения полного ускорения, действующего на вестибулярный анализатор в процессе движения, к ускорению свободного падения. С помощью разработанного количественного критерия можно оценивать нагрузку, полученную занимающимся при выполнении физических упражнений, совершаемых в разном темпе, в разных плоскостях и направлениях. Вестибулярная нагрузка интерпретируется как нейтральная при условии $0,85 < \eta < 1,15$; недогрузка - при $\eta < 0,85$; перегрузка - при $\eta > 1,15$.

Обобщение данных научных исследований в области тренировки устойчивости к укачиванию и проведенный педагогический эксперимент позволяют сделать заключение о том, что условиями тренировки устойчивости к укачиванию будущих морских специалистов являются:

- последовательное освоение упражнений, направленных на:
 - адаптацию организма к воздействию угловых и линейных ускорений;
 - укрепление мышц стопы и голени;
 - поддержание статического и динамического равновесия;
 - устойчивость к внутривестибулярным и межанализаторным конфликтам.
- моделирование внутривестибулярного конфликта посредством аperiodических воздействий вестибулярных раздражений;
- моделирование межанализаторного конфликта посредством выполнения упражнений с ограничением зрительного контроля;
- выполнение упражнений, сочетающих перегрузки ($\eta > 1,15$) и «недогрузки» ($\eta < 0,85$);
- увеличенное количество вращательных движений во фронтальной плоскости;
- контроль устойчивости к укачиванию по тесту сочетанием различных вестибулярных воздействий.

Наиболее эффективным способом тренировки устойчивости человека к укачиванию является применение упражнений на тренажерах и без них моделирующих внутрианализаторные и межанализаторные конфликты с учетом количественного критерия вестибулярной нагрузки.

Литература

1. Алексеев В.Н., Каспранский Р.Р. Исторические аспекты разработки комплексных методов вестибулярной подготовки космонавтов/ В.Н. Алексеев, Р.Р. Каспранский // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. - №2(19). – С.126-132.
2. Зайцев А.А. Способ расчета вестибулярной нагрузки в упражнениях профессионально-прикладной физической и спортивной подготовки/ А.А. Зайцев, А.А. Васюкевич, Б.В. Сорока // Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки (теория и методика профессионального образования): научный рецензируемый журнал. / Под ред. д-ра пед. наук, проф. Г.А. Бокаревой.– Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011.- №17 – С. 124 – 132.
3. Зайцев А.А. Вестибулярные нагрузки и их мультимодальное моделирование на специальных тренажерах // А.А. Зайцев, Н.К. Полещук, А.Б. Макаревский // Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки (теория и методика профессионального образования): научный рецензируемый журнал.– Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. - №2 (32) – С.78-83.
4. Китаев-Смык Л.А. Психология стресса/Л.А. Китаев-Смык. – М.: Наука, 1983. – 368 с.

5. Стрелец В.Г. Методы изучения и тренировки органов равновесия пилотов / В.Г.Стрелец.- Л., 1972.- 80 с.
6. Хиллов К.Л. Функция органа равновесия и болезнь передвижения / К.Л. Хиллов.- Л.: Медицина, 1969.- 280 с.
7. Шарапов В.И. Охрана труда рыбаков океанического лова / В.И. Шарапов. – М.: Легкая промышленность, 1984. – С.145.
8. Шегельман И.Р., Полещук Н.К., Зайцев А.А. Способ тренировки и устройство для его осуществления // ЕР, Патент России № 2067470. кл. А 63 В 23/00, Опубл. в Б. И., 1996, № 28
9. Яроцкий А.И. К диагностике и методологии повышения статокINETической устойчивости человека / А.И.Яроцкий// Материалы научной конференции "Отечественная оториноларингология, вклад ученых академии в ее становление" (К 100-летию первой кафедры оториноларингологии) 10-11 марта 1993.- СПб.: Российская Военно-медицинская академия, 1993.- С.116-117.

References

1. Alekseev V.N., Kaspransky R.R. Historical aspects of the development of complex methods of vestibular training of cosmonauts / V.N. Alekseev, R.R. Kaspransky // Manned space flights. - 2016. - No. 2 (19). - S. 126-132.
2. Zaitsev A.A. A method for calculating the vestibular load in exercises of professionally applied physical and sports training / A.A. Zaitsev, A.A. Vasyukevich, B.V. Soroka // News of the Baltic State Academy of Fishing Fleet: Psychological and Pedagogical Sciences (Theory and Methods of Professional Education): Scientific peer-reviewed journal. / Ed. Dr. ped. Sciences, prof. G.A. Bokareva. - Kaliningrad: Publishing house of the BFFSA, 2011.- No. 17 - pp. 124 - 132.
3. Zaitsev A.A. Vestibular loads and their multimodal modeling on special trainers // A.A. Zaitsev, N.K. Poleshchuk, A.B. Makarevsky // Bulletin of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet: Psychological and Pedagogical Sciences (Theory and Methods of Professional Education): Scientific peer-reviewed journal. - Kaliningrad: Publishing House of the BFFSA, 2015. - No. 2 (32) - P.78-83.
4. Kitaev-Smyk L.A. Psychology of stress / L.A. Kitaev-Smyk. - Moscow: Nauka, 1983. -- 368 p.
5. Strelets V.G. Methods of studying and training the organs of balance of pilots / V.G. Strelets.- L., 1972.- 80 p.
6. Khilov K.L. Balance organ function and movement sickness / K.L. Khilov, Leningrad: Medicine, 1969, 280 p.
7. Sharapov V.I. Labor protection of oceanic fishing fishermen / V.I. Sharapov. - M.: Light industry, 1984. - P.145.
8. Shegelman I.R., Poleshchuk N.K., Zaitsev A.A. A method of training and a device for its implementation // ЕР, Russian Patent No. 2067470. class. А 63 В 23/00, Publ. in B.I., 1996, no. 28
9. Yarotsky A.I. On the diagnosis and methodology of increasing the statokinetic stability of a person / AI Yarotsky // Materials of the scientific conference "Domestic otorhinolaryngology, the contribution of academics to its formation" (To the 100th anniversary of the first department of otorhinolaryngology) March 10-11, 1993.- SPb. : Russian Military Medical Academy, 1993.- P.116-117.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анатолий Александрович Зайцев, доктор педагогических наук, профессор, Заведующий кафедрой физической культуры, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: aaz39@rambler.ru

Anatoly A. Zaitsev, Dr. Sci. (Edu), Professor, Head of the Department of Physical Culture, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russian Federation e-mail: aaz39@rambler.ru

Александра Анатольевна Зайцева, кандидат педагогических наук Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: aa_zaytseva39@rambler.ru

Aleksandra A. Zaitseva Ph.D. (Edu) Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022 Russian Federation, e-mail: aa_zaytseva39@rambler.ru

Надежда Константиновна Полещук, доктор педагогических наук, профессор, Военная академия воздушно - космической обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь, Россия

Nadegda K. Poleshchuk, Dr. Sci. (Edu), Professor, Military Academy of Aerospace Defense, named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukova, Tver, Russia

УДК 65.012.23

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.081

Особенности социального дисконтирования в проектах государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе

Р.А. Мнацаканян¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Одной из проблем принятия решений о целесообразности реализации проектов, имеющих значимую общественную и социальную составляющую, является незавершенность методологического обеспечения процедуры социального дисконтирования. Существующие в этой области теоретические и методические наработки носят общий характер, что не позволяет учитывать ни специфику проектов, ни особенности той сферы деятельности, в которой они реализуются. Предметом исследования в данной работе выступают методы принятия инвестиционных решений в рыбной отрасли, основанных на принципах государственно-частного партнерства. Исходя из этого, целью статьи является развитие методологии анализа проектов ГЧП, реализуемых в сфере рыбного хозяйства в части, относящейся к теоретическому обоснованию моделей, базирующихся на технологии социального дисконтирования, а также выбора социальной ставки дисконтирования. Новизна работы состоит в выработке комплексного подхода, отражающего разносторонние взгляды на процедуру социального дисконтирования. Результатом работы стала разработка рекомендаций по принятию общественно ориентированных решений о целесообразности и формах реализации проектов ГЧП в сфере рыбного хозяйства.

Ключевые слова: Рыбохозяйственный комплекс, государственно-частное партнерство, социальное дисконтирование, ставка дисконтирования, анализ инвестиций, методы принятия решений.

Specific features of social discounting in public-private partnership projects in the fisheries

Robert A. Mnatsakanyan¹¹Kaliningrad State Technical University

Abstract. The underdeveloped methodological support of the social discounting procedure is one of the problems of decision-making on the implementation of projects with significant social and social components. The available theoretical and methodological developments are of a general nature and do not allow taking into account either the specifics of projects or the specifics of the field of activity in which they are implemented. The subject of this paper is the methods of making investment decisions in fisheries, which are based on the principles of public-private partnership. The purpose of this paper is to develop a methodology for the analysis of PPP projects implemented in the field of fisheries in terms of theoretical substantiation of models based on the technology of social discounting and the choice of a social discount rate. The novelty of our results lies in an integrated approach reflecting versatile views on the procedure of social discounting. The author offers recommendations for making publicly oriented decisions on the implementation of PPP projects in fisheries.

Key words: Fisheries, public-private partnerships, social discounting, discount rate, investment analysis, decision-making methods.

Введение

Одной из наиболее сложных и ответственных задач, которую необходимо решать в процессе экономического обоснования проектов ГЧП, является оценка величины ожидаемых выгод с учетом их распределения во времени. В инвестиционном анализе инструментом такой оценки выступает процедура дисконтирования – финансовая операция, обычно применяемая к денежным потокам и позволяющая определить современную ценность будущих денег. Однако в случае проектов ГЧП, реализуемых в сфере РХК, для которых характерны широкое использование общественных ресурсов и создание социально значимых эффектов, процедура дисконтирования должна включать оценку не только денежных потоков, но и потоков различного рода немонетизируемых благ.

Необходимость дисконтирования будущего, как правило, обосновывается двумя главными причинами. Во-первых, считается, что с течением времени, по мере экономического роста растет уровень доходов и общее благосостояние, в силу чего блага, которыми располагают люди сегодня, ценятся ими выше аналогичных благ в отдаленном

будущем. Другим основанием для дисконтирования выступает склонность людей к текущему потреблению, даже если они ожидают, что завтра станут более богатыми. Очевидно, что обе названные причины носят не только экономический, но и социальный характер (во втором случае они обусловлены коллективной психологией индивидов). И хотя существуют сомнения в том, должно ли данное не вполне рациональное поведение людей отражаться в мерах экономической политики (особенно на уровне компаний), оценка межвременных предпочтений все же остается одним из общепризнанных способов нахождения баланса между интересами нынешнего и будущих поколений. Важнейшим показателем, призванным обеспечивать согласованность этих интересов в рамках современной экономической парадигмы выступает социальная ставка дисконтирования.

Несмотря на большое количество научных работ, посвященных объяснению природы и обоснованию выбора величины социальной ставки дисконтирования, все они носят общий характер, не позволяющий учесть ни специфику тех или иных проектов, ни особенности сферы деятельности, в которой они реализуются. Данная проблема –

недостаточное методологическое обоснование социальной ставки дисконтирования – приобретает критически важное значение в случае проектов, имеющих значимую общественную и социальную составляющие. К числу таких проектов относятся инициативы по организации государственно-частного партнерства (ГЧП) в сфере рыбохозяйственного комплекса (РХК).

Целью данной статьи является развитие методологии анализа проектов ГЧП, реализуемых в рыбной отрасли, в части, относящейся к теоретическому обоснованию моделей, базирующихся на технологии социального дисконтирования. Работа также нацелена на выработку рекомендаций, способных стать основой для принятия общественно ориентированных инвестиционных решений в сфере РХК.

1. Материалы и методы: базовая модель социальной ставки дисконтирования

Проекты ГЧП, обычно реализуются на «стыке» общественного и частного секторов экономики. Поэтому для привлечения негосударственных участников они требуют применения стандартных (т.е. признаваемых частными инвесторами) подходов к оценке своей эффективности. Одним из таких стандартных подходов является анализ издержек и выгод. Однако специфика рыбной отрасли требует корректировки создаваемых в результате партнерства государства и бизнеса издержек и выгод с учетом как текущих, так и долговременных интересов общества. Данное требование выполняется посредством включения в процедуру дисконтирования проектов ГЧП дополнительных параметров, позволяющих оценивать социально значимые эффекты. Одним из важнейших параметров такого расширенного анализа издержек и выгод является социальная ставка дисконтирования.

Особый подход к дисконтированию издержек и выгод в проектах ГЧП в рыбной отрасли обусловлен спецификой используемых в деятельности отрасли ресурсов, приводящей к возникновению пролонгированных эффектов, которые к тому же зависят от множества трудно прогнозируемых и малоизученных факторов [1]. Высокие ставки дисконтирования подразумевают, что при принятии экономических решений их будущим последствиям придается меньшее значение и, следовательно, общество не видит необходимости в сегодняшнем бережливом использовании ресурсов рыболовства. И напротив, применение в анализе затрат и выгод низких ставок дисконтирования означает согласие в том, чтобы сохранить потенциал ресурсов рыбной отрасли в интересах будущих поколений.

Социальная (общественная) ставка дисконтирования – относительно устоявшееся понятие, довольно давно являющееся предметом пристального внимания экономистов. Различные теоретические и практические аспекты данного показателя рассматривались в трудах многих известных ученых, таких как Ramsey, Baumol, Kula, Pearce, Evans и др. [2 – 6], его анализу также посвящен ряд работ современных российских авторов [7 – 10].

Обычно термин «социальная ставка дисконтирования» применяется для сопоставления с точки зрения интересов общества альтернативных способов использования ресурсов. Чаще всего сравнение проводится либо между различными вариантами инвестирования общественных ресурсов, либо между различными периодами времени получения эффектов от использования этих ресурсов. Исходя из этого, социальная ставка дисконтирования может рассматриваться как эквивалент альтернативных издержек общества, обусловленных перераспределением инвестиционных и иных ресурсов из общественного в частный сектора экономики. Согласно другой интерпретации социальной ставки дисконтирования, она выступает мерой временного предпочтения, отражающей готовность общества к отказу от сегодняшнего потребления благ в пользу будущих поколений. Очевидно, что разные подходы к интерпретации социальной ставки дисконтирования обуславливают различие методов ее расчета. Но какая бы методика не применялась для расчета социальной ставки дисконтирования, ее величина, как правило, отличается от величины коммерческой ставки дисконтирования, отражающей интересы и предпочтения не всего общества, а отдельных индивидумов.

Существует, как минимум, две фундаментальные причины, обуславливающие данный эффект. Во-первых, общество, представляющее собой совокупность индивидумов в силу синергетического эффекта, возникающего в результате объединения их ресурсов, вправе оценивать совокупные будущие выгоды выше и, напротив, совокупные будущие издержки ниже по сравнению с суммарными выгодами и издержками отдельных индивидумов, принимающих экономические решения независимо друг от друга [11]. Во-вторых, обществу в целом присуще свойство повышенной ответственности за благополучие будущих поколений, в силу которого оно готово отказаться от сегодняшнего потребления благ в пользу их будущего потребления по ставке ниже той, которая характерна для составляющих его отдельных индивидумов.

Помимо пониженной величины социальной ставки дисконтирования некоторые авторы считают необходимым использование ставки, величина которой снижается с течением времени, что еще больше усиливает приоритет интересов будущих поколений при принятии инвестиционных решений [12]. Однако наличие различных теоретических аргументов как в пользу, так и против использования уменьшающейся ставки социального дисконтирования приводит к различию во взглядах на ее переменный характер. Кроме того, не до конца ясным остается и то, насколько быстро должна снижаться величина этой ставки в случае признания ее переменного характера [13].

В настоящее время существует довольно много моделей социального дисконтирования и подходов к выбору нормы дисконта в них [14]. Классическим способом определения величины социальной ставки дисконтирования является поиск максимума общественной полезности, получаемой от потребления в различные периоды времени. В рамках этого подхода, согласно формуле, предложенной Рамсеем, данный показатель

рассчитывается как общественная ставка межвременного потребления:

$$STPR = \rho + \mu \cdot g, (1)$$

где ρ – ставка индивидуальных межвременных предпочтений, μ – эластичность предельной общественной полезности по потреблению, g – темп роста потребления на душу населения.

Более современная версия уравнения (1) отражает попытку учесть изменение жизненного риска, измеряющего вероятность недожития индивида до предполагаемого периода его будущего потребления. В результате индивидуальная ставка предпочтений ρ разделяется на две составляющие: δ – «чистая» ставка межвременных предпочтений и L – уровень риска для жизни:

$$STPR = \delta + L + \mu \cdot g (2)$$

При этом величина первого параметра в уравнении (2) – «чистой» ставки межвременных предпочтений крайне сложно поддается эмпирической оценке, а разброс ее значений составляет от 0 до 0,5, даже в странах, имеющих сопоставимые социально-экономические условия [15]. Это, а также ряд других обстоятельств, сильно затрудняют использование социального дисконтирования при анализе нетривиальных инвестиционных проектов, к числу которых относятся и проекты ГЧП в рыбной отрасли. Чтобы правильно выбрать ставку дисконтирования в таких проектах, необходимо ясное понимание причин того, почему люди предпочитают определенное количество сегодняшних выгод по сравнению с тем же количеством выгод в будущем.

2. Результаты и обсуждение: модифицированная модель ставки

Как отмечалось выше, в настоящее время существует два основных подхода к объяснению феномена предпочтения нынешнего потребления будущему: альтернативная стоимость упущенных выгод и чистое предпочтение времени (нетерпение). Рассмотрим обе эти причины, определяющие необходимость процедуры дисконтирования через призму специфики проектов ГЧП, реализуемых в рыбной отрасли.

Современный взгляд на концепцию социальных альтернативных издержек, прежде всего, основывается на оценке производительности капитала. Следуя данному принципу, решения о целесообразности ГЧП опираются, с одной стороны, на сравнение доходности проекта в случае его реализации только государством или только частным сектором, а с другой, на оценку пролонгированных эффектов в случае отказа от текущего использования требуемых для реализации проекта ресурсов. Как и в большинстве других отраслей экономики, инвестирование ресурсов в проекты РХК осуществляется в надежде на получение большего количества благ (ресурсов), доступных для будущего потребления. Таким образом, будущая отдача от инвестиций (которая может быть интерпретирована как упущенное текущее потребление), по сути, является будущим потоком потребления. Исходя из этого, процентная ставка на вложенный в отрасль капитал и, следовательно, ставка дисконта отражают альтернативные издержки отказа от планируемого потребления.

Другой взгляд на дисконтирование опирается на принцип чистых временных предпочтений, основной предпосылкой действия которого выступает фактор «нетерпения» – в силу своей психологии люди предпочитают пользоваться благами немедленно, а не откладывать их потребление на отдаленное будущее. Экономисты иногда называют ставку дисконтирования, основанную на этом принципе, «социальной предпочтительностью времени» [16]. Чистые временные предпочтения также могут свидетельствовать о вере в рост благосостояния общества, что делает будущие блага менее ценными, чем сегодняшние. В качестве теоретического обоснования данного аргумента в пользу дисконтирования часто используется концепция убывающей предельной полезности.

Суммируя взгляды разных авторов, исследующих рассматриваемую нами проблематику, можно заметить, что различия в подходах к объяснению причин, вызывающих необходимость социального дисконтирования экономических проектов носят не только теоретический, но и практический характер. Так, например, имеются доказательства, что социальная ставка дисконтирования, основанная на объяснении предпочтений по времени, оказывается ниже, чем ставка, рассчитанная на основе альтернативной стоимости [17].

Основываясь на собственных исследованиях [1], а также на результатах работ других авторов, мы приходим к выводу, что предпочтение времени является более слабым обоснованием для дисконтирования, чем социальные издержки, поскольку оценка этого предпочтения опирается на субъективные и крайне переменчивые суждения индивидов. Не вполне ясным остается и то, имеет ли феномен предпочтения какую-либо рациональную основу, даже когда речь идет об обычных потребительских товарах, не говоря уже о специфических природных, экосистемных и иных благах, создающих благоприятные условия для жизни людей либо для самой их жизни [18]. Таким образом, принцип социальной предпочтительности времени не может служить надежной основой для обоснования социальной ставки дисконтирования, по крайней мере, в случае анализа проектов, имеющих, помимо социальной составляющей, также существенную экономическую компоненту, типичных для рыбной отрасли.

Поскольку эффекты ГЧП носят выраженный пролонгированный характер, анализ общественных издержек и выгод, включающий учет интересов будущих поколений и переноса текущих эффектов в будущее представляется наиболее сложным аспектом применения данной технологии. Ключевыми факторами, обуславливающими эту сложность, являются неопределенность социально-экономической ситуации, а также специфические риски проектов ГЧП, характерные для рыбной отрасли. Вопрос о том, какие аспекты неопределенности и риска должны быть включены в показатель социальной нормы дисконта, и то каким образом они должны находить отражение в величине этого показателя, был и остается предметом научной дискуссии [19]. По нашему мнению, при анализе масштабных проектов, к числу которых относятся многие проекты ГЧП в сфере рыбного хозяйства, необходимо выделять, как минимум, 2 типа рисков:

общеэкономические (макроэкономические) и частные (риски проекта).

Первый – макроэкономический риск связан с высокой степенью неопределенности будущего развития, обусловленной долгосрочным характером проектов, реализуемых на принципах ГЧП. В научной литературе и прикладных методиках предлагаются различные способы учета данного типа рисков, носящих универсальный, межотраслевой характер. Поэтому для учета их влияния на величину социальной ставки дисконтирования можно воспользоваться готовыми решениями. Одним из таких решений, позволяющим оценивать и учитывать неопределенность ожидаемых темпов экономического развития в условиях, когда рост носит неопределенный и некоррелированный с течением времени характер, может стать интеграция результатов статистического анализа в стандартную модель социальной ставки дисконтирования [20]:

$$STPR = \rho + \eta \cdot \mu_c - 0,5 \cdot \eta^2 \cdot \sigma_c^2, (3)$$

где μ_c и σ_c^2 – среднее значение и дисперсия экономического роста, соответственно.

Несмотря на свою простоту, данная модифицированная версия классической формулы Рамсея, может служить удобным инструментом для анализа и принятия инвестиционных решений в рамках проектов ГЧП в условиях макроэкономической неопределенности. Уравнение (3) отражает консервативный (осторожный) подход, предполагающий, что неопределенность в отношении будущего (отраженная дисперсией роста) требует увеличения вложений в безопасные активы, что, в свою очередь, приводит к снижению социальной ставки дисконтирования.

Другим значимым фактором, влияющим на величину социальной ставки дисконтирования, являются собственные риски проекта ГЧП. Учет данного рода рисков может выполняться посредством либо анализа различных сценариев, отражающих неопределенность, связанную с оценками затрат и выгод конкретного проекта, либо путем корректировки ставки дисконтирования путем добавления к ней некоторой надбавки – премии за риск. Оба эти подхода, в конечном счете, приводят к изменению предполагаемых чистых выгод от реализации проекта, с учетом вероятности того, что проект потерпит неудачу или создаваемые им блага в будущем утратят свою полезность.

В финансовой экономике проектный риск обычно имеет систематическую и несистематическую составляющие. Систематический риск не подлежит диверсификации путем перераспределения ресурсов между разными проектами, тогда как несистематические риски (например, неожиданные дополнительные затраты, вызванные техническими причинами) могут быть диверсифицированы и, следовательно, снижены. Природа возникновения систематического риска обусловлена взаимосвязью между макро- и микроэкономической неопределенностью, влияющей на результаты реализации проекта. Во многих странах, в том числе во Франции, Норвегии и Нидерландах, корректировка ставки дисконтирования с учетом систематического проектного риска является стандартным элементом анализа социальных издержек и выгод [21]. С учетом этого модифицированная формула Рамсея

(уравнение (3)) для расчета социальной ставки дисконтирования приобретает расширенный вид:

$STPR = r_f + \pi(\beta) = \rho + \eta \cdot \mu_c - 0,5 \cdot \eta^2 \cdot \sigma_c^2 + \pi(\beta)$, (4) где r_f – безрисковая ставка дисконта при наличии рисков роста, как показано в уравнении (3), а μ_c и σ_c^2 – среднее значение и дисперсия роста, $\pi(\beta)$ – премия за риск, β – коэффициент «бета» потребления, отражающий востребованность продукции и услуг проекта.

Для определения величины премии за риск в случае проектов ГЧП, реализуемых в рыбной отрасли можно также воспользоваться готовыми решениями, обращая внимание на применимость этих решений в специфических условиях отрасли. Одним из приемлемых, на наш взгляд, способов учета социальных проектных рисков несистематического характера может стать расчет их совокупной величины с помощью статистической модели $\pi(\beta) = \eta \cdot \beta \cdot \sigma_c^2$ [20].

В принципе, с теоретической точки зрения, каждый проект ГЧП имеет свой специфический коэффициент «бета». Однако учет этой индивидуальности сильно затрудняет анализ. Поэтому допустимым упрощением может стать использование неких «типичных» значений коэффициента «бета», характерных для общественно ориентированных проектов в той или иной стране, с их последующей корректировкой на особенности конкретного проекта. Возможность такого упрощения обусловлена тем фактом, что обычно премия за социальный риск, полученная расчетным путем крайне незначительна по сравнению с величиной ставки дисконтирования (например, в Великобритании она менее 0,1%) [22]. Вместе с тем, упрощенный подход к оценке рисков проекта в случае рыбного хозяйства следует применять с осторожностью, поскольку для данной отрасли характерны специфические риски, которые должны находить адекватное отражение в ставке дисконтирования с тем, чтобы государство (общество) не принимало на себя чрезмерно большие обязательства и не подвергалось угрозе существенного ухудшения благосостояния. Поэтому тщательная оценка социальных рисков должна быть обязательной особенно в случае финансового участия государства реализации частных проектов [23].

Следует отметить, что необходимость применения социального дисконтирования не является бесспорной. В том случае, если принимаемые решения основываются на предпочтении обществом справедливого распределения выгод между поколениями (т.е. вместо обеспечения эффективности общество заботится о равенстве интересов текущего и будущих поколений), они не нуждаются в дисконтировании будущих выгод. Но все же можно с уверенностью предположить, что большинство людей согласны с тем, что имеются, по крайней мере, некоторые обязанности для обеспечения благополучия будущих поколений. Теоретически это наиболее просто реализуется посредством дисконтирования чистых выгод, позволяющего сбалансировать цели эффективности и справедливости. Однако теоретическая простота дисконтирования в случае ГЧП в рыбной отрасли нивелируется несоответствием специфике отрасли

многих стандартных показателей, обычно используемых для анализа инвестиционных проектов. Так, например, такие широко распространенные в практике инвестиционного анализа показатели как NPV и BCR в этом случае оказываются недостаточно информативными, поскольку мало учитывают распределение многих важных неэкономических последствий проектов во времени (например, таких как неопределенность и необратимость хозяйственного использования природных ресурсов, влияющих на устойчивость основанного на этих ресурсах бизнеса). Тем не менее, несмотря на все недостатки, дисконтирование денежных потоков в течение всего срока реализации проекта должно рассматриваться в качестве основного инструмента принятия решений, затрагивающих интересы разных поколений в рамках анализа затрат и выгод [24]. Тщательное изучение качественных долгосрочных аспектов, а также чистых приведенных значений и предполагаемых соотношений затрат и выгод в целом по-прежнему считаются ключевым элементом процесса принятия решений в случае ГЧП в рыбной отрасли. При этом следует помнить, что общество не может установить слишком высокую норму социального дисконтирования, поскольку оно должно принимать во внимание интересы будущих поколений. В частности, ставка дисконтирования не только общественных, но и экономических выгод не может значительно превышать ожидаемый долгосрочный темп экономического роста, поскольку противное означает обесценивание значительной части будущего богатства в течение короткого периода времени.

Заключение

Выбор ставки дисконтирования, учитывающей помимо прочего общественные интересы, представляется наиболее сложной из всех существующих проблем, связанных с экономической оценкой проектов ГЧП в рыбной отрасли. Сложность этой проблемы состоит в том, что она включает в себя не только фундаментальные вопросы функционирования экономики таких проектов, но и ряд философских аспектов взаимодействия и взаимного влияния экономики, социума и природы [25]. Очевидно, что наша статья не может претендовать на окончательное решение столь сложной и неоднозначной проблемы, которая на протяжении ряда лет выступает предметом острых дискуссий ученых и практиков. Вместе с тем, необходимость и востребованность поиска новых решений в политике развития российского РХК, в полной мере учитывающей интересы общества не терпит отлагательства в ожидании достижения академического консенсуса.

Поскольку в настоящее время анализ затрат и выгод по-прежнему выступает основным методом выработки и принятия управленческих решений в случае инвестиций, в том числе, инвестиций в рамках ГЧП, важным является правильный выбор ставки дисконтирования. Цель нашей работы состояла в

том, чтобы упорядочить представления о возможных способах выбора социальной ставки дисконтирования с тем, чтобы читатели могли сформировать собственный подход к оценке и учете всего спектра эффектов, возникающих в связи с реализацией ГЧП в рыбной отрасли. Хотя многие сделанные нами выводы носят предварительный характер, результатом проделанной работы стала формулировка ряда рекомендаций, способных стать основой для выработки решений, принимаемых в отношении реализации ГЧП в сфере рыбного хозяйства. Вкратце эти рекомендации сводятся к следующим тезисам.

Во-первых, анализ последствий реализации проектов ГЧП должен опираться на дисконтирование общественных издержек и выгод, отражающее интересы как текущего, так и будущих поколений.

Во-вторых, процедура социального дисконтирования помимо прочего должна включать учет альтернативных издержек и, в том числе, сравнение различных вариантов реализации проектов, включая отказ от ГЧП и передачу проекта в частный сектор.

В-третьих, учитывая, с одной стороны, неустрашимую неопределенность, характерную для большинства проектов в рыбной отрасли, а с другой, невозможность полноценного отражения этой неопределенности в ставке дисконтирования, ответственность общества перед будущими поколениями должна быть сосредоточена главным образом на благосостоянии следующего (ближайшего к ныне живущему) поколения. Тем не менее, следует проявлять осторожность, чтобы по возможности не нанести ущерб интересам и более отдаленных поколений. Последнее обеспечивается снижением величины ставки с течением времени.

В-четвертых, для обеспечения интересов следующего поколения при оценке проектов ГЧП в рыбной отрасли следует использовать ставку дисконтирования ниже обычной коммерческой ставки и немного превышающую ожидаемый долгосрочный темп экономического роста. Хотя имеется немало рекомендаций по расчету величины социальной ставки дисконтирования, ее выбор во многом носит нетривиальный, трудно формализуемый характер, основанный на использовании различных экспертных оценок, в том числе, неэкономических параметров.

Общим выводом проведенного исследования является необходимость продуманного подхода к учету всего спектра общественных интересов при принятии решений о реализации ГЧП в сфере РХК и, в частности, отражение временного аспекта этих интересов. Мы считаем, что внимание к будущему, являющееся одним из национальных приоритетов развития нашей страны, должно стать основой таких решений. В техническом плане это требует особого подхода как к процедуре социального дисконтирования, так и к выбору в ее рамках социальной ставки дисконтирования.

Литература

1. Мнацаканян А.Г., Корнева О.В., Харин А.Г., Мнацаканян Р.А., Финансовые аспекты устойчивого развития предприятий рыбохозяйственного комплекса: теория, методология и практика. – Калининград: Издательство ФГБОУ ВО "КГТУ", 2018. – 167 с.

2. Ramsey P. F. A Mathematical Theory of Saving // *Economic Journal*. 1928. No. 38, pp. 543-549.
3. Baumol W. On the Social of Discount // *American Economic Review*. 1968. Vol. 58, pp. 788-802.
4. Kula E. An empirical estimation on the social time preference rate for the United Kingdom // *Environmental and planning*. 1985. No. 17, pp. 199-212.
5. Pearce D., Ulph D. A social discount rate for the United Kingdom. Edward Elgar, Cheltenham. 1999, pp. 268–285.
6. Evans D. Uncertainty and social discounting for the very long term // *Journal of Economic Studies*. 2009. Vol. 36. No. 5, pp. 522-540.
7. Емельянов А.М. Оценка значения социальной ставки дисконтирования для России и проведение межстрановых сравнений // *Финансы и кредит*. – 2007. – №46. – С. 7-18.
8. Коссова Т. В., Шелунцова М. А. Социальная ставка дисконтирования в России: методология, оценка, межрегиональные различия // *Экономическая наука современной России*. – 2012. – № 3 (58). – С. 16-27.
9. Самашков А. К. Основные подходы к определению социальной ставки дисконта при оценке эффективности капиталобразующих инвестиций // *Труды ИСА РАН*. – 2013. – Том 63. – № 1. – С 62-71.
10. Мнацаканян А.Г., Харин А.Г. Использование методологии динамического анализа при принятии решений о предоставлении квот на инвестиционные цели // *Рыбное хозяйство*. – 2017. – №1. – С. 11-17.
11. Харин А.Г. Анализ социального капитала как среды предпринимательской деятельности // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2019. – № 9(492). – С. 1700–1716.
12. Freeman M.C., Groom B. How certain are we about the certainty-equivalent long term social discount rate? // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2016. Vol. 79, pp. 152-168.
13. Cropper M., Freeman M., Groom B., Pizer W. Declining Discount Rates. *American Economic Review: Papers and Proceedings*. 2014. No. 104(5), pp. 538-543.
14. Groom B., Koundouri P., Panipoulou K., Pantelides T. Declining Discount Rates: How much does model selection affect the certainty equivalent discount rate? // *Journal of Applied Econometrics*. 2007. No. 22(3), pp. 641-656.
15. Council of Economic Advisers. Long-Term Interest Rates: A Survey. 2015 [Электронный ресурс]. URL: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/interest_rate_report_final.pdf.
16. Harberger A.C., Jenkins G.P. Musings on the social discount rate // *Journal of Benefit-Cost Analysis*. 2015. No. 6(1), pp. 6-32.
17. Gramlich E.M. *A Guide to Benefit-Cost Analysis*. Prentice-Hall, 2d ed. 1990. – 246 p.
18. Pearce D.W., Turner R.K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. The Johns Hopkins University Press. 1989. – 396 p.
19. Arrow K., Cropper V., Gollier C., Groom B., Heal G., Newell R., Nordhaus W., Pindyck R., Pizer W., Portney P., Sterner T., Tol R, Weitzman M. Determining Benefits and Costs for Future Generations // *Science*. 2013. No. 341 (6144). pp. 349-350.
20. Gollier C. Term Structures of Discount Rates for Risky Projects. IDEI working paper. [Электронный ресурс]. URL: http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/by/gollier/term_structure_v4.pdf
21. Hepburn C., Koundouri P., Panopoulou E., Pantelidis T. Social discounting under uncertainty: A cross-country comparison // *Journal of Environmental Economics and Management*. 2009. No. 57(2), pp. 140-150.
22. Groom B., Maddison D. New Estimates of the Elasticity of Marginal Utility for the UK // *Environmental and Resource Economics*. 2019. Vol. 72, pp. 1155-1182.
23. Baumstark L., Gollier C. The relevance and the limits of the Arrow-Lind Theorem // *Journal of Natural Resources Policy Research*. 2014. No. 6 (1), pp. 45-49.
24. Drupp M., Freeman M. C., Groom B., Nesje F. Discounting Disentangled // *American Economic Journal: Economic Policy*. 2018. No. 10(4), pp. 109-134.
25. Мнацаканян А.Г., Харин А.Г. Принципы устойчивого развития в управлении компанией // *Социально-экономические процессы и явления*. – 2016. – Том 11. – № 10. – С. 41-51.

References

1. Mnatsakanyan A. G., Korneva O. V., Kharin A. G., Mnatsakanyan R. A., *Finansovyye aspekty ustoychivogo razvitiya predpriyatiy rybokhozyaystvennogo kompleksa: teoriya, metodologiya i praktika* [Financial aspects of sustainable development of enterprises in the fishing industry: theory, methodology and practice.]. Kaliningrad: Izdatel'stvo FGBOU VO "KGTU", 2018. (in Russ)
2. Ramsey P. F. A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*. 1928. No. 38, pp. 543-549.
3. Baumol W. On the Social of Discount. *American Economic Review*. 1968. Vol. 58, pp. 788-802.
4. Kula E. An empirical estimation on the social time preference rate for the United Kingdom // *Environmental and planning*. 1985. No. 17, pp. 199-212.
5. Pearce D., Ulph D. A social discount rate for the United Kingdom. Edward Elgar, Cheltenham. 1999, pp. 268-285.
6. Evans D. Uncertainty and social discounting for the very long term // *Journal of Economic Studies*. 2009. Vol. 36. No. 5, pp. 522-540.
7. Yemel'yanov A. M. Otsenka znacheniya sotsial'noy stavki diskontirovaniya dlya Rossii i provedeniye mezhstranovykh sravneniy [Assessment of the value of the social discount rate for Russia and cross-country comparisons]. *Finansy i kredit*. 2007. №46. S. 7-18.
8. Kossova T. V., Sheluntsova M. A. Sotsial'naya stavka diskontirovaniya v Rossii: metodologiya, otsenka, mezhregional'nyye razlichiya [Social discount rate in Russia: methodology, assessment, interregional differences]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii*. 2012. № 3 (58). S. 16-27.
9. Samoshkov A. K. Osnovnyye podkhody k opredeleniyu sotsial'noy stavki diskonta pri otsenke effektivnosti kapitaloobrazuyushchikh investitsiy [Basic approaches to determining the social discount rate in assessing the efficiency of capital-forming investments]. *Trudy ISA RAN*. 2013. Tom 63. № 1. S 62-71.

10. Mnatsakanyan A. G., Kharin A. G. Ispol'zovaniye metodologii dinamicheskogo analiza pri prinyatii resheniy o predostavlenii kvot na investitsionnyye tseli [Using the methodology of dynamic analysis when making decisions on the granting of quotas for investment purposes]. Rybnoye khozyaystvo. 2017. №1. S. 11-17.
11. Kharin A. G. Analiz sotsial'nogo kapitala kak sredy predprinimatel'skoy deyatelnosti [Analysis of social capital as an environment for entrepreneurial activity]. Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2019. № 9(492). S. 1700–1716.
12. Freemana M.C., Groomb B. How certain are we about the certainty-equivalent long term social discount rate? // Journal of Environmental Economics and Management. 2016. Vol. 79, pp. 152-168.
13. Cropper M., Freeman M., Groom B., Pizer W. Declining Discount Rates. American Economic Review: Papers and Proceedings. 2014. No. 104(5), pp. 538-543.
14. Groom B., Koundouri P., Panipoulou K., Pantelides T. Declining Discount Rates: How much does model selection affect the certainty equivalent discount rate? Journal of Applied Econometrics. 2007. No. 22(3), pp. 641-656.
15. Council of Economic Advisers. Long-Term Interest Rates: A Survey. 2015. URL: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/interest_rate_report_final.pdf.
16. Harberger A.C., Jenkins G.P. Musings on the social discount rate. Journal of Benefit-Cost Analysis. 2015. No. 6(1), pp. 6-32.
17. Gramlich E. M. A Guide to Benefit-Cost Analysis. Prentice-Hall, 2d ed. 1990.
18. Pearce D. W., Turner R. K. Economics of Natural Resources and the Environment. The Johns Hopkins University Press. 1989.
19. Arrow K., Cropper V., Gollier C., Groom B., Heal G., Newell R., Nordhaus W., Pindyck R., Pizer W., Portney P., Sterner T., Tol R, Weitzman M. Determining Benefits and Costs for Future Generations/ Science. 2013. No. 341 (6144). pp. 349-350.
20. Gollier C. Term Structures of Discount Rates for Risky Projects. IDEI working paper. URL: http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/by/gollier/term_structure_v4.pdf
21. Hepburn C., Koundouri P., Panopoulou E., Pantelidis T. Social discounting under uncertainty: A cross-country comparison. Journal of Environmental Economics and Management. 2009. No. 57(2), pp. 140-150.
22. Groom B., Maddison D. New Estimates of the Elasticity of Marginal Utility for the UK. Environmental and Resource Economics. 2019. Vol. 72, pp. 1155-1182.
23. Baumstark L., Gollier C. The relevance and the limits of the Arrow-Lind Theorem. Journal of Natural Resources Policy Research. 2014. No. 6 (1), pp. 45-49.
24. Drupp M., Freeman M. C., Groom B., Nesje F. Discounting Disentangled. American Economic Journal: Economic Policy. 2018. No. 10(4), pp. 109-134.
25. Mnatsakanyan A. G., Kharin A. G. Printsipy ustoychivogo razvitiya v upravlenii kompaniyey [The principles of sustainable development in company management]. Sotsial'no-ekonomicheskiye protsessy i yavleniya. 2016. Tom 11. № 10. S. 41-51.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Роберт Альбертович Мнацаканян, старший преподаватель кафедры инструментальных методов в экономике и управлении, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: robert_mnac@mail.ru

Robert A. Mnatsakanyan, Senior Lecturer of the Department of Instrumental Methods in Economics and Management, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky prospect, 1,
e-mail: robert_mnac@mail.ru

УДК 303.725.23

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.082

Методика составления плана повышения энергетической эффективности припортового регионального электротехнического комплекса

Д.В. Луценко¹

¹Технопарк Калининградского государственного технического университета

Аннотация. Припортовый региональный электротехнический комплекс является инфраструктурой техноценологического типа. Ввиду энерговооружённости и значительной установленной электрической мощности приёмников электрической энергии его экономическая эффективность в большей степени обусловлена энергетической эффективностью. Одним из направлений повышения энергетической эффективности является энергосбережение, предполагающее выполнение энергетических обследований объектов и оценку потенциала энергосбережения. Практическая реализация потенциала энергосбережения, основанного на мероприятиях организационного характера, заключается в составлении и выполнении плана повышения энергоэффективности. Это предусматривает последовательное и постепенное, без технического перевооружения сокращение объектами своего электропотребления таким образом, чтобы к заданному времени достичь требуемых целевых показателей. Предлагается разработать методику составления плана повышения энергоэффективности, учитывающего техноценологические свойства припортового регионального электротехнического комплекса и обеспечивающего максимальную вероятность достижения цели. Теоретической основой данной методики является ранговый анализ и комбинаторная теория ранговой динамики, позволяющие на системном уровне описывать вероятностные закономерности электропотребления систем техноценологического типа.

Ключевые слова: ранговое отображение, дважды стохастическая матрица, целевое ранговое параметрическое распределение по электропотреблению, ранговая норма, план повышения энергоэффективности припортового регионального электротехнического комплекса, энергосбережение, динамическое программирование.

Method of developing an increase plan energy efficiency of the portal regional electrotechnical complex

Dmitry V. Lutsenko¹

¹Techno park of Kaliningrad state technical university

Abstract. The portal regional electrotechnical complex is a technocenological type infrastructure. In view of the power supply and the significant installed electrical capacity of the receivers of electrical energy, its economic efficiency is largely due to energy efficiency. One of the directions for increasing energy efficiency is energy saving, which involves performing energy inspections of facilities and assessing the potential for energy saving. Practical implementation of the energy saving potential based on organizational measures is to draw up and implement a plan to improve energy efficiency. This provides for a consistent and gradual, without technical re-equipment, reduction of their electricity consumption by objects in such a way as to achieve the required target indicators by a given time. It is proposed to develop a methodology for drawing up a plan for increasing energy efficiency, taking into account the technocenological properties of the portal regional electrotechnical complex and ensuring the maximum probability of achieving the goal. The theoretical basis of this methodology is rank analysis and the combinatorial theory of rank dynamics, which allow describing the probabilistic patterns of power consumption of systems of technocenological type at the system level.

Key words: rank mapping, double stochastic matrix, target rank parametric distribution by power consumption, rank norm, plan for increasing energy efficiency of the portal regional electrotechnical complex, energy saving, dynamic programming

Введение

Современный припортовый региональный электротехнический комплекс (далее – ПРЭК) является инфраструктурой техноценологического типа [1]. Экономическая эффективность ПРЭК в значительной степени обусловлена его энергетической эффективностью, направлением повышения которой является энергосбережение. Энергосберегающим мероприятиям предшествуют энергетические обследования и оценка потенциала энергосбережения [2]. После этого наступает этап планирования, включающий разработку мероприятий организационного и технического характера. Мероприятия организационного характера направлены на снижение электропотребления (далее – ЭП) объектами ПРЭК и достижение целевых значений без технического перевооружения. По своей сути они представляют план повышения энергоэффективности, на каждом

шаге которого объектам ПРЭК устанавливаются индивидуальные нормы снижения ЭП, не наносящие ущерб основному режиму функционирования.

План повышения энергоэффективности ПРЭК (далее – план) должен, с одной стороны, обеспечивать максимальную вероятность достижения целевых показателей на системном уровне, а, с другой стороны, индивидуальный характер предъявляемых объектам норм снижения ЭП. Для этого предлагается при его разработке использовать аппарат ранговых распределений [1] и подходы комбинаторной теории ранговой динамики [3,4].

Основой для составления плана являются:

$$1 \leq i \leq n; 1 \leq t \leq T;$$

$$w(r); w^*(r); F_1(x), \dots, F_n(x); \mathbf{R} = \parallel \parallel_{i,t}^{n,T} \parallel_{i,t=1} \quad (1)$$

где $w(r)$, $w^*(r)$ – ранговые параметрическое распределения, характеризующее текущее и

целевое ЭП ПРЭК (рис. 1); $F_i(x)$ – функция распределения ЭП i -го объекта; \mathbf{R} – матрица ранговых отображений; $r_{i,t}$ – ранг i -го объекта в t -й момент времени; Π – количество объектов; T – количество временных интервалов.

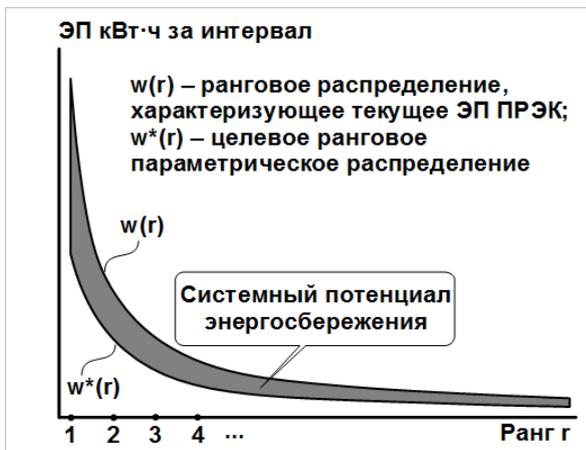


Рис. 1. Системный потенциал энергосбережения

Преобразуем каждый столбец матрицы \mathbf{R} (1) в подстановочную матрицу [3,4]:

$$\Pi_t = \|\pi_{i,j} \|_{i,j=1}^n; \pi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \pi(i)=j; \\ 0, & \pi(i) \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

На основе последовательности Π_1, \dots, Π_T вычислим дважды стохастическую матрицу [3]:

$$\mathbf{P} = \|\rho_{i,j} \|_{i,j=1}^n = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Pi_t, \quad (3)$$

где $\rho_{i,j}$ устанавливает вероятность того, что i -й объект при построении рангового параметрического распределения займёт ранг, равный j .

1. Шаговая задача планирования

Итак, требуется спланировать за время T^* достижение целевого рангового распределения $w^*(r)$, что равносильно реализации системного потенциала энергосбережения [1,2]:

$$\Delta W = \sum_{r=1}^n w(r) - \sum_{r=1}^n w^*(r). \quad (4)$$

Пусть в момент времени $t \in 1, \dots, T^*$ требуется сократить ЭП на величину $\Delta W_t = \sum_{r=1}^n w(r) - \sum_{r=1}^n w_t(r)$.

Рассмотрим случайное событие, соответствующее выполнению ранговой нормы $w_t(r)$ в отдельном ранге r_j . Оно состоится, когда определённый объект займёт ранг r_j и его ЭП ввиду убывающего характера рангового распределения будет принадлежать интервалу $[w_t(r_j + 1), w_t(r_j))$ (рис. 2).

Так как ранг r_j могут занимать различные объекты, то полная вероятность рассматриваемого события вычисляется следующим образом:

$$P_{\Sigma}(w_t(r_j)) = \sum_{i=1}^n \rho_{i,r_j} \cdot [F_i(w_t(r_j)) - F_i(w_t(r_j + 1))] \quad (5)$$

где ρ_{i,r_j} – вероятность того, что i -й объект займёт ранг r_j (3); $F_i(x)$ – функция распределения ЭП i -го объекта.

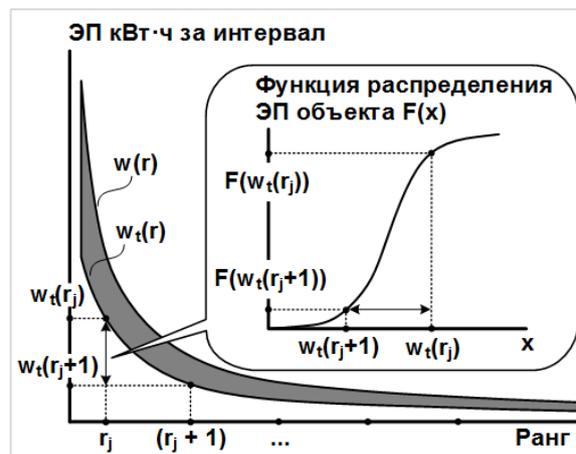


Рис. 2. Ранговая норма снижения

Основываясь на свойствах матрицы \mathbf{P} (3) можно также определить вероятность выполнения ранговой нормы снижения i -ым объектом:

$$P_{\Sigma}(i) = \sum_{r \in R_i} \rho_{i,r} \cdot [F_i(w_t(r)) - F_i(w_t(r + 1))], \quad (6)$$

где R_i – ранги, занимаемые i -ым объектом.

Нахождение параметров $w_t(r) = \hat{W}_1 / r^{\hat{\beta}}$ выполняется на основе функции вида:

$$\delta(\hat{W}_1, \hat{\beta}) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n P_{\Sigma}(\hat{W}_1 / r^{\hat{\beta}}) \longrightarrow \max, \quad (7)$$

где $P_{\Sigma}(\hat{W}_1 / r^{\hat{\beta}})$ – вероятность выполнения нормы снижения в ранге r .

Задавшись требуемой долей снижения

$$\Delta \bar{W}_t = \left(\sum_{r=1}^n w(r) - \sum_{r=1}^n \hat{W}_1 / r^{\hat{\beta}} \right) / \sum_{r=1}^n w(r), \quad (8)$$

первую точку \hat{W}_1 можно выразить:

$$\hat{W}_1(\hat{\beta}) = (1 - \Delta \bar{W}_t) \cdot \sum_{r=1}^n w(r) / \sum_{r=1}^n 1 / r^{\hat{\beta}}, \quad (9)$$

где $w(r)$ – ранговое параметрическое распределение, характеризующее текущее ЭП ПРЭК.

Тогда (7) преобразуется к следующему виду:

$$\delta(\hat{\beta}) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n P_{\Sigma}(\hat{W}_1(\hat{\beta}) / r^{\hat{\beta}}) \longrightarrow \max. \quad (10)$$

На основе (10) можно найти такую форму распределения $w_t(r) = \hat{W}_1 / r^{\hat{\beta}}$, которая

обеспечивает максимальную вероятность его достижения.

Изменим вид выражения (10):

$$\hat{\beta} = \operatorname{argmax}_{\beta} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n P_{\Sigma} \left[\frac{W_1(\beta)}{r^{\beta}} \right], \quad (11)$$

тогда, задавшись интервалом изменения рангового коэффициента $\hat{\beta} \in [0,5; 2,5]$, экстремум можно определить численным способом.

Таким образом, установив на выбранном шаге $t \in 1, \dots, T^*$ плана повышения энергоэффективности ПРЭК долю снижения $\Delta \bar{W}_t$ (8), можно определить параметры формы целевого для данного шага распределения $W_t(r)$, максимизирующего вероятность выполнения ранговых норм снижения.

2. Построение оптимального плана повышения энергоэффективности ПРЭК

Итак, за время T^* необходимо привести ЭП ПРЭК в состояние, соответствующее $w^*(r)$ (рис. 1). Рассмотрим последовательность всех шаговых состояний ПРЭК как траекторию:

$$W = W_0(r), W_1(r), \dots, W_{T^*}(r), \quad (12)$$

где $W_0(r)$ характеризует текущее и $W_{T^*}(r)$ целевое ЭП ПРЭК.

Тогда целевую функцию определения оптимальной траектории (12) представим в следующем виде:

$$W_{\text{opt}} = \operatorname{argmax}_{W \in \mathbf{W}} \left(\sum_{t=0}^{T^*} Y(w_t(r), w_{t-1}(r)) \right), \quad (13)$$

где \mathbf{W} – множество траекторий; $Y(w_t(r), w_{t-1}(r))$ – функция, характеризующая выигрыш при переходе ПРЭК из $(t-1)$ -го в t -е состояние.

Определять W_{opt} предлагается путём решения задачи динамического программирования, заключающегося в выборе состояния, обеспечивающего максимальный выигрыш на текущем шаге, при условии максимизации выигрыша на предыдущих шагах.

Разберём понятие выигрыша (13). Каждый i -й объект в процессе смены состояний снизит ЭП относительно текущего на следующую величину:

$$\Delta w_i = w_t(\pi_t(i)) - w_{(t-1)}(\pi_{(t-1)}(i)), \quad (14)$$

где $\pi_{(t-1)}$, π_t – ранговые отображения в $(t-1)$ и t шаги разрабатываемого плана повышения энергоэффективности.

Данное снижение состоится, если i -й объект будет находиться в ранге $r_j = \pi_t^{-1}(i)$ и выполнит установленную ранговую норму $w_t(r_j)$. При переводе системы из текущего состояния в последующее, как одно событие рассматриваются и выполнение отдельным объектом ранговой нормы (рис. 2), и снижение его ЭП на заданную величину (14). Это посылка лежит в основе оценки выигрыша (13). Пусть

пока неизвестна ранговая конфигурация π_t в (14).

Тогда, приняв Δw_i за выигрыш i -го объекта и учтя его размещение в различных рангах, можно сопоставить соответствующие вероятности (табл. 1).

Таблица 1

Связь выигрыша и вероятности его получения

Величина	$\Delta w(r_1)$	$\Delta w(r_2)$...
Вероятность	$P_{r_1}(w_t(r_1))$	$P_{r_2}(w_t(r_2))$...

На основе таблицы 1 можно оценить ожидаемый выигрыш i -го объекта:

$$\Delta \bar{w}_i = \sum_r \Delta w(r) \cdot p_r(w(r)). \quad (15)$$

За ПРЭК в целом ожидаемый выигрыш равен:

$$\Delta M_{\Sigma,t} = \sum_{i=1}^n \sum_{r \in R_i} (w_i - w_t(r)) \cdot p_{i,r} \cdot q_i(w_t(r)); \quad (16)$$

$$q_i(w_t(r)) = F_i(w_t(r)) - F_i(w_t(r+1)),$$

R_i – ранги, занимаемые i -ым объектом.

На величину ожидаемого выигрыша $\Delta M_{\Sigma,t}$ (16)

влияет форма распределения $W_t(r)$. Тогда по аналогии с (11), а также заданных $W_{(t-1)}(r)$, $\pi_{(t-1)}$, F_1, \dots, F_n (1), \mathbf{P} (3), $\Delta \bar{W}_t$ (8) можно составить следующую целевую функцию:

$$\beta_t = \operatorname{argmax}_{\beta \in 0,5, \dots, 2,5} (\Delta M_{\Sigma,t}(\beta)), \quad (17)$$

по которой в результате численного решения определить параметры W_1 , β распределения $W_t(r)$, обеспечивающие максимальный ожидаемый выигрыш по итогам шага t .

Установление на основе $W_t(r)$ требуемой величины снижения ЭП объекту можно выполнить, если известен занимаемый им ранг. Для системы в целом это выполняется с использованием рангового отображения π_t . Определим апостериорные вероятности и пересчитаем дважды стохастическую матрицу:

$$P_t = \| \| P_{t(i,r)} \| \|_{i,r=1}^n; \quad (18)$$

$$P_{t(i,r)} = \frac{p_{i,r} \cdot (F_i(w_t(r)) - F_i(w_t(r+1)))}{P_{\Sigma}(w_t(r))}.$$

Применительно к пересчитанной матрице P_t (18), решая задачу о назначениях, определим ранговое отображение π_t , характеризующее наиболее вероятное размещение объектов на распределении $W_t(r)$ [3,4].

Под величиной требуемого снижения ЭП Δw (14) для каждого из n объектов ПРЭК будем понимать управляющее воздействие, которое формально определим следующим образом:

$$U_t = \| u_{t(i)} \|_{i=1}^n; \quad (19)$$

$$u_{t(i)} = w_{(t-1)}(\pi_{(t-1)}(i)) - w_t(\pi_t(i)).$$

Аналитическое выражение для составления оптимального плана имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{matrix} W_{opt} \\ \Pi_{opt} \end{matrix} \right\} = \operatorname{argmax}_{\substack{W \in \mathbf{W}, \\ \Pi \in \mathbf{\Pi}}} \left(\sum_{t=1}^{T^*} \Delta M_{\Sigma, t} \begin{pmatrix} w_{(t-1)}(r), \pi_{(t-1)}, \\ w(r), \pi_t, \\ \mathbf{P}, \\ \Delta \bar{W}_t \end{pmatrix} \right); \quad (18)$$

$$U_{opt} = \Phi \{ W_{opt}; \Pi_{opt} \},$$

$W_{opt} = w_1(r), \dots, w_{T^*}(r)$ – оптимальная траектория (последовательность) ранговых параметрических

распределений; $\Pi_{opt} = \pi_1, \dots, \pi_{T^*}$ – оптимальная траектория (последовательность) ранговых отображений; $\Delta \bar{W}_t$ – требуемая доля снижения ЭП ПРЭК на шаге t (8); U_{opt} – оптимальная траектория (последовательность) управляющих воздействий; Φ – функционал, переводящий траектории W_{opt} и Π_{opt} по выражению (19) в траекторию U_{opt} .

Описанный подход решения задачи динамического программирования можно представить в виде методики составления плана повышения энергоэффективности ПРЭК (рис. 3).



Рис. 3 – Схема методики составления оптимального плана повышения энергоэффективности ПРЭК

Таким образом, методика построения оптимального плана повышения энергоэффективности основывается на решении задачи динамического программирования. Её отличительными особенностями являются: а) закреплённые концы и заданное количество шагов; б) порядок, предполагающий сначала нахождение оптимального рангового распределения, устанавливающего ЭП ПРЭК, а затем расчёт на его основе управляющего воздействия; в) учёт вероятностного характера ранговой динамики. Получаемый план характеризуется максимальной вероятностью достижения целевого состояния и индивидуальностью предъявляемых норм снижения электропотребления.

Заключение

В статье представлен подход для составления плана повышения энергоэффективности припортового регионального электротехнического комплекса, основанного на реализации мероприятий организационного характера. Отличительными особенностями данного плана являются: учёт техноценологических свойств ПРЭК и вероятностных закономерностей ЭП не только отдельных объектов, но и системы в целом; индивидуальный характер предъявляемых норм снижения ЭП; обеспечение максимальной вероятности достижения конечной цели.

Литература

1. Гнатюк, В.И., Кивчун, О.Р., Яфасов, А.Я. (2017) Определение потенциала энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса в рамках развития интеллектуальных энергетических систем. Морские интеллектуальные технологии. 3(37). Т.1. 142-149.
2. Гнатюк, В.И. Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат] / В.И. Гнатюк. – Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2013]. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>.
3. Луценко, Д.В. (2017) Основы применения комбинаторной теории ранговой динамики в исследовании функционирования припортового регионального электротехнического комплекса. Морские интеллектуальные технологии. 4(38), Т.2. 122-127.
4. Луценко, Д.В. Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат] / Д.В. Луценко. – Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2018]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.

References

1. Gnatyuk, V.I., Kivchun, O.R., Yafasov, A.Ya. (2017) Opredeleniye potentsiala energosberezheniya obyektov priportovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa v ramkakh razvitiya intellektualnykh energeticheskikh system [Determination of the energy saving potential of the facilities of the port electrical complex within the framework of the development of intelligent energy systems]. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 3(37). T.1. 142-149.
2. Gnatyuk, V.I. Potencial energosberezheniya tekhnocenoza [Energy saving potential of technocenosis] [Traktat] / V.I. Gnatyuk. – Pervoe izdanie. – Elektronnyye tekstovyye dannyye. – Kaliningrad: [Izd-vo Kaliningradskogo innovatsionnogo centra «Tekhnocenozy»], [2013]. Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>.
3. Lutsenko, D.V. (2017) Osnovy primeneniya kombinatornoj teorii rangovoy dinamiki v issledovanii funktsionirovaniya priportovogo regionalnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa [Bases of application of the combinatory theory of ranked dynamics in the research of the functioning of the regional electrical engineering complex of marine port]. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 4(38). T.2. 122-127
4. Lucenko, D.V. Kombinatornaya teoriya rangovogo dinamiki [Combinatorial theory of rank dynamics] [Traktat] / D.V. Lucenko. – Pervoe izdanie. – Elektronnyye tekstovyye dannyye. – Kaliningrad: [Izd-vo Kaliningradskogo innovatsionnogo centra «Tekhnocenozy»], [2018]. – Rezhim dostupa: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Владимирович Луценко, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник технопарка, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, д. 1, e-mail: lutsenko@bk.ru

Dmitry V. Lutsenko, Ph.D. (Eng), associate professor, science researcher of techno park, Kaliningrad state technical university, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation e-mail: lutsenko@bk.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

УДК 001.4

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.083

Исследование и моделирование оперативного планирования грузовых операций в морском порту

Ю.Я. Настин¹¹Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Статья продолжает прежние исследования автора в области построения модели оперативного планирования грузовых операций в морском порту. Затрагивается широкий круг вопросов (стратификация, семиотика, искусственный интеллект). Основное внимание уделено моделированию на верхней «математической» страте - объёмно-календарному планированию на основе многоэтапного нелинейного и динамического программирования (НП), эвристик и экстраполяции. Оптимальный план должен поступать на нижнюю страту, где рассматриваются каргопланы, грузовые технологические схемы, а средства моделирования – системы искусственного интеллекта. В основе моделей верхней страты - диспач-демередж, сталийное время, норма одновременной обработки. Предложены три группы моделей. Во-первых, n-этапные сепарабельные задачи НП; показан алгоритм решения двухэтапной задачи НП динамическим программированием с понижением размерности и множителем Лагранжа; обсуждаются проблемы решения при $n > 2$. Во-вторых, экстраполяционные модели; они включают в себя в качестве «ядер циклов» модели из 1-й группы; обсуждаются способы применения эвристик. В-третьих, несепарабельные задачи НП, которые учитывают процедуры вхождения судов в норму одновременной обработки. Обозначено направление исследований и проектирования модели планирования.

Ключевые слова: морской порт, грузовые операции, моделирование, стратификация, нелинейное и динамическое программирование, n-этапность, экстраполяция, эвристика.

Research and modeling of operational planning of cargo operations in the sea port

Yurii Y. Nastin¹¹Kaliningrad state technical University, Russian Federation

Abstract. The article continues the author's previous research in the field of building a model for operational planning of cargo operations in a seaport. It covers a wide range of issues (stratification, semiotics, artificial intelligence). The main attention is paid to modeling on the upper "mathematical" stratum-volume-calendar planning based on multi-stage nonlinear and dynamic programming (NP), heuristics and extrapolation. The optimal plan should be sent to the lower stratum, where cargoplans, cargo technological schemes are considered, and modeling tools – artificial intelligence systems. The upper stratum models are based on dispatch-demurrage, steel time, and the rate of simultaneous processing. Three groups of models are proposed. First, n-stage separable NP problems; an algorithm for solving a two-stage NP problem by dynamic programming with reduced dimension and a Lagrange multiplier is shown; solution problems for $n > 2$ are discussed. Second, extrapolation of the model; they include models from group 1 as "cycle cores"; ways to apply heuristics are discussed. Third, non-separable NP tasks that take into account the procedures for vessels entering the simultaneous processing norm. The direction of research and design of the planning model is indicated.

Keywords: sea port, cargo operations, modeling, stratification, nonlinear and dynamic programming, n-phasing, extrapolation, heuristics.

Введение

Цель настоящей статьи – систематизировать и продолжить ранее начатые автором работы по исследованию и моделированию деятельности морских портов, в частности, применительно к одной из главных задач - оперативному планированию грузовых операций на судах, [1; 2; 3; 4, с.29-37]. Инструментальной основой послужили методы линейного, нелинейного и динамического программирования, методы экстраполяции процесса планирования на основе эвристики. В работе [2, Настин, Пожидаев] рассматривалась проблема построения модели с двумя уровнями: «математическим» и «семиотическим». Это соответствует креативной идее [5, Месарович и др.] о возможности и необходимости стратификации сложных систем, при которой на каждой страте существуют «свой мир», свои процессы и свои языки их описания. В нашем

случае - это «языки» математического программирования и ситуационного моделирования. Последние основаны на семиотике; впоследствии они влились в проблематику искусственного интеллекта [6, Поспелов; 7, Болотова]. Упомянем ещё об одной работе – [8, Настин], в которой сделана попытка расширить объект моделирования до деятельности океанического рыболовецкого флота и применить такие инструменты искусственного интеллекта, как продукционная база знаний, метод резолюции Робинсона, язык моделирования Пролог.

Как видно из вышесказанного, уже 2-4 десятилетия назад становилось понятно, что для моделирования такой сложной системы, как морской порт и его связи с промысловой деятельностью флота, необходимо расширять набор инструментов в виде теорий и методов. В настоящее время это понимание оформляется в более технологическую IT-терминологию: проблемно-ориентированная платформа, интеллектуальная экспертная система

управления и пр.

Однако ядром управления и моделирования в морском порту остаётся по-прежнему задача оперативного планирования грузовых операций (на её математической страте). Понимание того, что она является сложнейшей задачей объёмно-календарного планирования, фиксировалось и ранее в вышеперечисленных работах. Однако уровень вычислительной техники тех лет не позволял надеяться на возможность сколько-нибудь полного её решения. Отчасти поэтому научные исследования того времени и более позднего периода игнорировали суть этой задачи, использовали упрощённые модели на основе линейного программирования, теории массового обслуживания, теории расписаний, которые, например, не могли учитывать положения нормативно-правового базиса морского порта.

В настоящее время, по нашему мнению, создались необходимые предпосылки для продолжения тех работ: высокий (на много порядков выше) уровень вычислительной техники, всеобщий тренд к цифровой экономике, наконец, конкурентная борьба портов за клиентов.

Исследование и моделирование грузовых операций в морском порту на основе нелинейного многоэтапного программирования

Задача объёмно-календарного планирования решается в портах теперь как и ранее преимущественно на основе опыта и интуиции, опираясь на знание технологической специфики производства грузовых работ и многих положений нормативно-правового базиса. Например, положений о сталийном времени, о норме одновременной обработки судов и порядке вхождения судов в эту норму, о диспаче-демередже и пр.

Нормативно-правовой базис играет большую роль в регламентации управления в портах. Ранее он создавался в соответствующем отраслевом центре, например, в Министерстве рыбного хозяйства СССР и отражался в документе [9, Нормы обработки судов]. Теперь таким интегрирующим документом является федеральный закон [10, ФЗ «О морских портах...»]. Вот пример того, как он ограничивает разнообразие обычаев портов: «3. Обычаи морского порта не должны противоречить Конституции Российской Федерации, общепризнанным принципам и нормам международного права, международным договорам Российской Федерации, Кодексу торгового мореплавания Российской Федерации, настоящему Федеральному закону...». А вот фрагмент обычаев, которые устанавливает, например, Корсаковский морской рыбный порт [11, с.1]: «1.2. Свод обычаев регламентирует: ...производственный режим работы оператора морского терминала; правила и нормы оказания услуг; обязанности операторов морского терминала порта, судовладельцев, грузовых агентов и т.п.; порядок, условия обработки и обслуживания находящихся в порту транспортных средств».

Сведения об обычаях, о предлагаемых оператором морского терминала условиях договора перевалки груза, сведения о тарифах и правилах их применения размещаются операторами морских терминалов на их официальных сайтах в сети Интернет и должны быть доступны для

ознакомления без взимания платы. [10, ФЗ, часть 5, введена 18.07.2017 N 177-ФЗ].

Вывод из анализа вышесказанного: принципиальных изменений в нормативном регулировании деятельности морских портов не произошло. Однако может потребоваться «настройка» модели на отдельные особенности того или иного порта.

Вернёмся к нашей задаче. Ежедневно диспетчерская служба порта составляет сменную суточный план работы порта, действие которого начинается с 08.00 утра и распространяется обычно на несколько суток вперёд, минимально – на три смены, максимально – на 3-5 суток. Основным разделом плана для морских рыбных портов являются грузовые операции: выгрузка морепродуктов с судов, вернувшихся с промысла и погрузка необходимого снаряжения на суда, отправляющиеся на промысел. Однако это не принципиально, грузы могут быть любые.

Одна из трудностей планирования грузовых операций - дефицит ресурсов, которые нужно распределить между судами так, чтобы уменьшить потери от их простоя. Дефицит возникает по разным причинам, например, из-за неравномерности загрузки порта, из-за стремления порта к снижению непроизводительных простоев перегрузочных линий.

Возьмём за основу известную в теории нелинейного программирования (НП) модель распределения усилий. Назовём её МОДЕЛЬ-1:

$$h = \sum_{i=1}^n h_i(x_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq v, \quad x_i \geq 0 \quad \forall i=1:n \quad \dots (2)$$

где:

- h - целевая функция, потери от простоя судов под выгрузкой-погрузкой, руб,
- n - число судов, за простоя которых отвечает порт и которые нуждаются в грузовой обработке (другими словами – находятся в норме одновременной обработке - НОО),
- x_i - искомая переменная – потенциальная производительность ресурсов, привлекаемых для обработки i-судна, т/час,
- $h_i(x_i)$ - функция «процесса», зависимость потерь порта от производительности ресурсов x_i , руб,
- v - средняя производительность ресурсов порта, т/час.

Для задания функции $h_i(x_i)$ используем положение о диспаче-демередже (премия-штраф) порта за досрочную обработку и за сверхнормативное время простоя (нормативное время – это сталийное время). Введём необходимые переменные и функции:

- c_i - затраты на содержание i-судна на стоянке в порту, руб/час,
- t_i - остаток сталийного времени i-судна на начало планируемых суток, на 8.00, обозначим $t_0=0$, час,
- g_i - остаток груза на момент $t_0=0$, который нужно выгрузить (погрузить) с i-судна, т,

a_i - предельная интенсивность обработки i -судна (зависит, например, от числа грузовых люков на судне), т/час,
 $y_i(x_i) = \min(a_i, x_i)$ - кусочно-линейная функция интенсивности обработки i -судна; вместо неё можно ввести n ограничений $x_i \leq a_i$, однако это резко повысит сложность решения задачи нелинейного программирования; с вычислительной точки зрения $y_i(x_i)$ играет роль штрафной функции, см рис. 1,
 $s_i(x_i) = g_i / y_i(x_i)$ - планируемое время обработки судна, час, см рис. 2,
 $\Delta(x_i) = s_i(x_i) - t_i$ - разность «планируемое время обработки i -судна минус остаток сталии», час,
 $z_i(\Delta(x_i)) = \begin{cases} f_1 & \Delta(x_i) < 0 \\ f_2 & \Delta(x_i) \geq 0 \end{cases}$ f_1 – диспач, при $\Delta(x_i) < 0$ (досрочная обработка судна) возможное значение $f_1 = 0,5$ – премия 50%, см. рис. 3, f_2 – демередж, при $\Delta(x_i) \geq 0$ (в срок или просроченная обработка судна) возможное значение $f_2 = 1,0$ – штраф 100%,

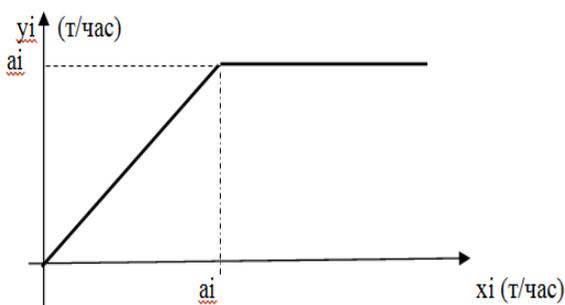


Рис. 1. Зависимость интенсивности обработки судна от производительности ресурсов

Теперь нетрудно записать функцию потерь h_i для i -судна, см (1) и рис. 4:

$$h_i(x_i) = c_i \cdot \left(\frac{g_i}{\min(a_i, x_i)} - t_i \right) \cdot z_i(\Delta(x_i)) \quad \forall i=1:n \quad (3)$$

или сокращённо $h_i(x_i) = c_i \cdot \Delta(x_i) \cdot z_i(\Delta(x_i))$.

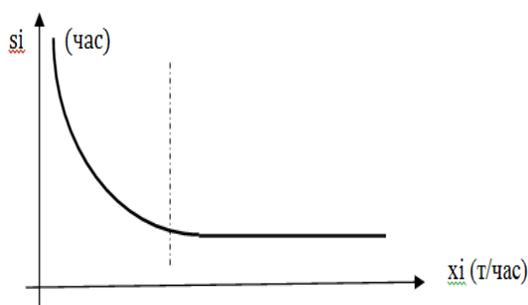


Рис. 2. Зависимость времени обработки судна от производительности ресурсов

Функция потерь h_i существенно нелинейна и недифференцируема. Поэтому для решения задачи МОДЕЛЬ-1 применим такой универсальный вычислительный метод, как динамическое программирование.

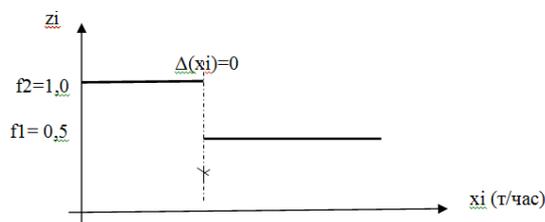


Рис. 3. Функция диспача-демереджа

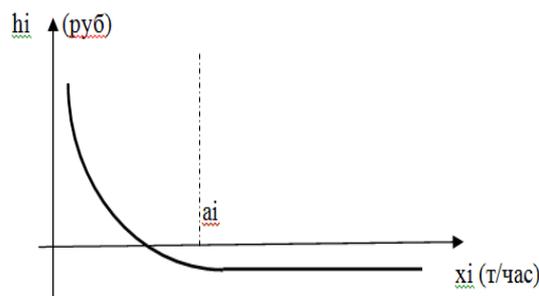


Рис. 4. Зависимость потерь от простоя от производительности ресурсов

Его эффективность здесь обеспечена свойством модели: она сепарабельная и одноэтапная: каждое i -слагаемое в ней содержит ровно одну i -переменную, которая не входит ни в какие другие слагаемые (переменные сепарированы по слагаемым).

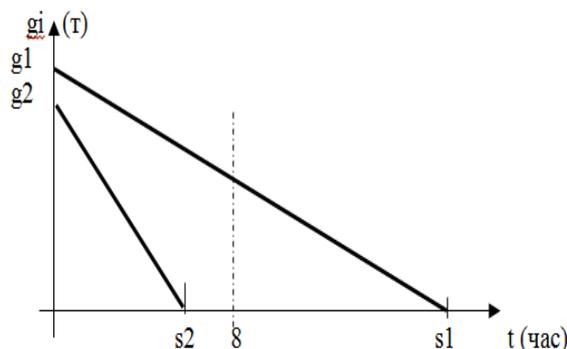


Рис.5. Траектории обработки судна-1 и судна-2 в МОДЕЛИ-1

Хотя МОДЕЛЬ-1 – статическая (в ней явно не фигурирует время), мы можем кое-что представить во времени, см рис. 5: обработка судна-1 закончена к концу 2-й смены, а 2-го судна – примерно через 6 часов после начала 1-й смены.

Усложним модель, поскольку аппроксимация реальных траекторий обработки отрезком прямой – слишком грубое упрощение. Для этого увеличим число интервалов управления до двух, получим МОДЕЛЬ-2. На рис. 6 показаны возможные траектории обработки судов при двух интервалах управления. Такая задача НП является уже двухэтапной, но по-прежнему сепарабельной: каждое i -слагаемое содержит ровно две i -

переменных (x_{i1} и x_{i2}), которые не входят ни в какие другие слагаемые.

Введём новые переменные и функции, см рис. 6:

x_{ij} - искомая переменная – производительность ресурсов, привлекаемых для обработки i -судна на j -этапе, $j=1, 2$,

V_j, a_{ij}, y_{ij} - переменные, аналогичные введённым ранее, но с учётом двух этапов управления, $j=1, 2$, T - длина 1-го этапа управления, $T=8$ – длительность 1-й смены.

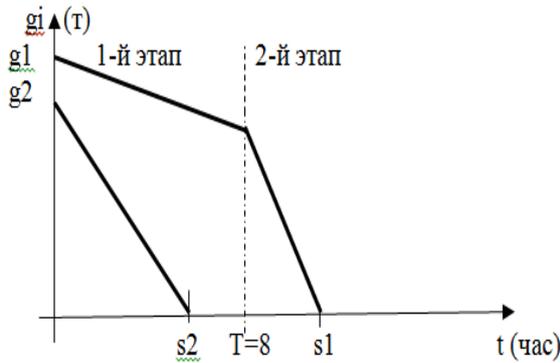


Рис. 6. Траектории обработки судна-1 и судна-2 в МОДЕЛИ-2

Как видно из рис. 6, функция времени обработки судна в двухэтапной модели будет иметь вид:

$$s_i(x_{i1}, x_{i2}) = \begin{cases} T + \frac{g_i - T \cdot y_{i1}(x_{i1})}{y_{i2}(x_{i2})} & \text{при } g_i > T \cdot y_{i1}(x_{i1}) \\ \frac{g_i}{y_{i1}(x_{i1})} & \text{при } g_i \leq T \cdot y_{i1}(x_{i1}) \end{cases} \quad (4)$$

Двухэтапная сепарабельная задача НП планирования обработки судов в порту будет в общем виде выглядеть так:

$$h(X_1, X_2) = \sum h_i(x_{i1}, x_{i2}) \rightarrow \min, \quad i = 1:n \quad (5)$$

$$\sum x_{i1} = v_1, \quad \sum x_{i2} = v_2, \quad x_{ij} \geq 0, \quad i=1:n, \quad j=1:2. \quad (6)$$

где:

- X_1 , – векторы управляющих переменных на 1-
- X_2 – м и 2-м этапах управления, т/час,
- v_1 и – суммарная производительность ресурсов
- v_2 порта на 1-м и 2-м этапах управления, т/час.

МОДЕЛЬ-2 более совершенна, она уже не статическая, а динамическая, в ней в явной форме присутствует время, присутствуют объёмное и календарное планирование (последнее – очень упрощённое). С вычислительной точки зрения МОДЕЛЬ-2 так же вполне доступна для решения, хотя она на порядок сложнее, чем МОДЕЛЬ-1.

При экспериментах на ЭВМ с МОДЕЛЬЮ-2 нами было применено динамическое программирование с предварительным понижением размерности задачи. Для этого использовался неизвестный множитель Лагранжа λ . Задача с множителем λ , но без 2-го ограничения (первый шаг понижения размерности), запишется так:

$$L(\lambda, X_1, X_2) = \sum h_i(x_{i1}, x_{i2}) + \lambda \sum x_{i2} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$\sum x_{i1} = v_1, \quad x_{ij} \geq 0, \quad i = 1:n, \quad j = 1:2.$$

Алгоритм её решения.

1) Выбирается или исчисляется некоторое значение $\lambda \geq 0$ (примерное начальное значение можно определить, исходя из особенности задачи, см ниже).

2) Понижается (это второй шаг) размерность (7) путём исключения вектора управления X_2 :

$$d_i(\lambda, x_{i1}) = \min_{0 \leq x_{i2} \leq v_2} [h_i(x_{i1}, x_{i2}) + \lambda x_{i2}] \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1:n, \quad j = 1:2.$$

После выполнения процедуры (8) на каждом i -м шаге формируются два одномерных массива:

$d_i(\lambda, x_{i1})$ и $x_2^0(\lambda, x_{i1})$.

3) Формируется задача одноэтапного нелинейного программирования, которая решается динамическим программированием:

$$d(\lambda, x_1) = \sum d_i(\lambda, x_{i1}) \rightarrow \min \quad (9)$$

$$\sum x_{i1} \leq v_1; \quad x_{i1} \geq 0, \quad i = 1:n.$$

Из решения задачи (9) находим оптимальное управление на 1-м этапе X_1^0 для текущего λ .

4) Находим вектор оптимального управления на 2-м этапе X_2^0 путём подстановки X_1^0 в функцию связи управлений $x_2^0 = f(\lambda, x_1^0)$.

5) Проверяем условие $|\sum x_{i2}(\lambda) - v_2| \leq \varepsilon$, где $\varepsilon \geq 0$ – заданная малая погрешность. Если оно выполняется, то выбранное в п.1 значение λ истинно, задача решена, конец. Если условие не выполняется, то переходим к п.1, где λ направленно корректируется и решение продолжается.

Как показали эксперименты на реальных исходных данных, всего для решения МОДЕЛИ-2 требуется не более 3-х итераций по поиску истинного значения λ и определения оптимальных векторов - плановых показателей X_1^0 и X_2^0 (использовались линейная и квадратичная интерполяция для поиска λ).

Понятно, что МОДЕЛЬ-2 хотя и является «заметно динамической», всё же не даст адекватных эффективных результатов для сменно-суточного плана. Поэтому продолжим усложнение: построим МОДЕЛЬ-3. На рис. 7 показаны две возможные траектории обработки судов на 3-х этапной модели.

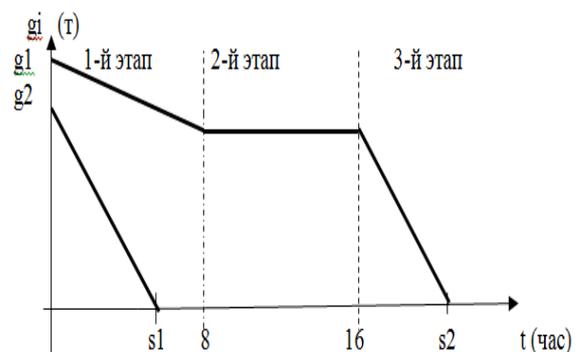


Рис. 7. Траектории обработки судна-1 и судна-2 в МОДЕЛИ-3

Обратим внимание: по судну-1 мы имеем три плановых показателя производительности ресурсов: x_{11} , x_{12} (здесь оно равно нулю, судно не планируется к обработке во 2-ю смену), x_{13} . Формульная запись для планируемого времени обработки $s(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ будет аналогична (4), но заметно сложнее:

$$s(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) = \begin{cases} \frac{g_i}{y_{i1}(x_{i1})} & \text{при } g_i \leq T_1 \cdot y_{i1}(x_{i1}) \\ T_1 + \frac{g_i - T_1 \cdot y_{i1}(x_{i1})}{y_{i2}(x_{i2})} & \text{при } g_i > T_1 \cdot y_{i1}(x_{i1}) \\ T_1 + T_2 + \frac{g_i - T_1 \cdot y_{i1}(x_{i1}) - T_2 \cdot y_{i2}(x_{i2})}{y_{i3}(x_{i3})} & \text{при } g_i > (T_1 \cdot y_{i1}(x_{i1}) + T_2 \cdot y_{i2}(x_{i2})) \end{cases} \quad (10)$$

Формульная запись МОДЕЛИ-3 будет аналогична выражениям (5) и (6):

$$h(X_1, X_2, X_3) = \sum h_i(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) \rightarrow \min, i = 1:n \quad (11)$$

$$\sum x_{i1} = v_1, \sum x_{i2} = v_2, \sum x_{i3} = v_3, x_{ij} \geq 0, i=1:n, j=1:3. \quad (12)$$

Алгоритм решения и объём вычислительных операций здесь будут на несколько порядков сложнее и больше, чем у алгоритма для МОДЕЛЬ-2.

Таким же образом можно построить МОДЕЛЬ-4 и МОДЕЛЬ-5. Здесь придётся поработать над преодолением «проклятия размерности», о котором упоминал автор метода динамического программирования Р. Беллман. При реализации МОДЕЛЬ-4 по каждому судну мы получим четыре оптимальных плановых показателя: производительность ресурсов для обработки судна в 1-ю смену, во 2-ю смену, в 3-ю смену и среднюю производительность на оставшийся период до конца обработки. Кроме того, мы получим оптимальное время обработки судна, а также значения сумм премий-штрафа (диспача-демереджа).

Несмотря на значительную сложность моделей 4 и 5 они всё же обладают двумя большими недостатками. В них не учитываются два фактора, требующие переключения управления: 1) окончание обработки судна внутри и на границе интервала «смена», 2) возможное изменение набора судов в норме одновременной обработки.

Поэтому рассмотрим эвристический приём учёта и реализации этих двух факторов.

Построим модель, которая бы экстраполировала план обработки судов и соответствующую ситуацию, используя, например, МОДЕЛЬ-3 как ядро цикла. Назовём такую модель ЭКСТРА-3 (от слова экстраполяция). Если строить ЭКСТРА-модели на основе предыдущих моделей, то мы получим ряд: ЭКСТРА-1, ЭКСТРА-2, ЭКСТРА-3 и т.д. Эти модели различаются своими «ядрами» - встроенными в них моделями 1, 2, 3.

Опишем в виде алгоритма работу модели ЭКСТРА-2. Для простоты мы здесь снижаем количество этапов ядра.

Итак, алгоритм работы модели ЭКСТРА-2:

- 1) Ввод исходных данных.
- 2) $N_{см} = 1$ (номеру смены присваиваем 1).

3) Включается ядро – блок оптимизации на основе МОДЕЛЬ-2. Получаем два оптимальных решения-планов: X_1^0 и X_2^0 .

4) Анализ на оси времени, какое *ближайшее* из 3-х будущих возможных событий имеет место: $A=1$ – конец смены, $A=2$ – окончание обработки какого-либо судна, $A=3$ – конец сталии у какого-либо судна и вхождение нового судна в НОО.

5) Экстраполяция ситуации (подготовка новых данных): ввод данных по новому судну, перемещение начала отсчёта вперёд на момент ближайшего события, уменьшение остатков грузов, уменьшение остатков сталии у судов и пр.

6) Анализ событий: $A=1$ (конец смены)? Если да, то переход к п.7. Если нет, то переход к п.3.

7) $N_{см} = N_{см} + 1$.

8) $N_{см} > 3$ (кончились сутки)? Если да, то переход к п.9. Если нет, то переход к п.3.

9) Печать сменно-суточного плана. Конец.

Обсудим проблему ввода в нашу модель судов, ожидающих вхождение в НОО судов. Для удобства используем самую простую МОДЕЛЬ-1. Пусть на момент t_0 суда $i=1$ и $i=2$ находятся в НОО, а судно $i=3$ готово к обработке и ожидает вхождения в НОО за первыми двумя судами. По правилам время вхождения судна $i=3$ в НОО (начало сталии) определится так: $t_{3н.ст}(x_1, x_2) = \min\{\tau_1, s_1(x_1), \tau_2, s_2(x_2)\}$. Сформулируем это словесно: сталия 3-го судна начнётся в один из из 4-х ближайших моментов времени: окончание обработки одного из судов, окончание сталии одного из судов. Целевая функция потерь для этих 3-х судов примет вид:

$$h(x_1, x_2, x_3) = h_1(x_1) + h_2(x_2) + h_3(x_1, x_2, x_3) \quad (13)$$

$$h_3 = c_3 \cdot \left[\frac{g_3}{\min(a_3, x_3)} - (t_{3н.ст}(x_1, x_2) + \tau_3) \right] \cdot z_3(x_1, x_2, x_3). \quad (14)$$

Как видно из (13), целевая функция перестала быть сепарабельной, так как 3-е слагаемое теперь включает в себя «чужие» переменные: из 1-го слагаемого и из 2-го. На чём отразится это свойство целевой функции? Мощный вычислительный метод – динамическое программирование – становится неприменимым. По крайней мере, неприменимым прямо, непосредственно. Требуется искать пути решения этой проблемы. Например, введение эвристик.

Заключение

Построение рентабельной модели оптимизации планирования обработки судов требует дальнейших исследований и экспериментов на ЭВМ, в том числе в направлении интеллектуальных систем, о чём здесь упоминалось вскользь. Проектированию должна подвергаться не одна узкая задача, как это представлялось в прежние времена (математическая страта), а целый комплекс задач оперативного управления. Оптимизм может поддерживаться тем обстоятельством, что результаты такой работы можно тиражировать по многим портам России и других стран.

Литература

1. Настин Ю.Я. Исследование двухэтапной модели оптимизации интенсивности обработки судов в порту // Тр. КТИРПХ. Калининград: Изд-во КТИРПХ, 1977, № 66, с.38-45.
2. Настин Ю.Я. Пожидаев В.Г. О взаимосвязи методов моделирования диспетчерского управления в морском рыбном порту // Тр. АтлантНИРО. Калининград: 1974, вып.55, с. 40-46•
3. Настин Ю.Я. Исследование вопросов повышения эффективности сменно-суточного планирования в морском рыбном порту с использованием методов нелинейного программирования на примере Калининградского морского рыбного порта: Автореф. дис. .канд. экон. наук. Одесса, 1977. - 24 с.
4. Дмитриевский В.А., Настин Ю.Я. Математические методы и модели исследования операций в рыбном хозяйстве: учебное пособие // Калининград: КТИРПХ, 1986. - 63 с.
5. Месарович М., Мако Д., Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: МИР, 1973. – 344 с.
6. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Энергоиздат, 1981. – 231 с.
7. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях. – М.: Финансы и статистика, 2012. – 664 с.
8. Настин Ю.Я. Имитация управления объектами транспортной сети на основе метода резолюций Робинсона // Региональные проблемы управления, экономики и финансов, сб. науч. трудов БГАРФ. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 1999. – с. 64-69.
9. Нормы обработки судов в морских рыбных портах и портовых пунктах. М.: Пищевая промышленность, 1965. – 191 с.
10. Федеральный закон «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 261-ФЗ от 08.07.2007 (в ред. От 27.12.2018).
11. Свод обычаев АО «Корсаковский морской торговый порт», https://ktmp.ru/site_get_file/390/Svod%20obyichaev%20Korsakov%202016%20god.pdf

References

1. Nastin Yu.Ya. Investigation of a two-stage model for optimizing the intensity of handling ships in the port // Tr. KTI RPKh. Kaliningrad: Publishing house KTI RPKh, 1977, No. 66, p. 38-45
2. Nastin Yu.Ya. Pozhidaev V.G. On the relationship of methods for modeling dispatch control in a sea fishing port // Tr. AtlantNIRO. Kaliningrad: 1974, issue 55, p. 40-46 •
3. Nastin Yu.Ya. Investigation of the issues of increasing the efficiency of shift-daily planning in a sea fishing port using nonlinear programming methods on the example of the Kaliningrad sea fishing port: Avtoref. dis. .kand. econom. sciences. Odessa, 1977. -- 24 p.
4. Dmitrovsky V.A., Nastin Yu.Ya. Mathematical Methods and Models for Researching Operations in Fisheries: a Study Guide // Kaliningrad: KTI RPKh, 1986. - 63 p.
5. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multi-level systems. - M.: MIR, 1973. -- 344 p.
6. Pospelov D.A. Logical and linguistic models in control systems. - M.: Energoizdat, 1981. -- 231 p.
7. Bolotova L.S. Artificial intelligence systems: knowledge-based models and technologies. - M.: Finance and statistics, 2012. -- 664 p.
8. Nastin Yu.Ya. Simulation of management of transport network objects based on the Robinson resolution method // Regional problems of management, economics and finance, collection of articles. scientific. works of BFARF. - Kaliningrad: BGARF Publishing House, 1999. - p. 64-69.
9. Standards for the handling of vessels in sea fishing ports and port points. M.: Food industry, 1965. -- 191 p.
10. Federal Law "On Seaports in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" No. 261-FZ of 08.07.2007 (as amended on 27.12.2018).
11. Cod of customs of Korsakov Commercial Sea Port JSC, https://ktmp.ru/site_get_file/390/Svod%20obyichaev%20Korsakov%202016%20god.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Юрий Яковлевич Настин, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры инструментальных методов в экономике и управлении, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский пр-т д.1, e-mail yury.nastin@kgtu.ru

Yurii Ya. Nastin, PhD. (Econ), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Instrumental Methods in Economics and Management, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1, e-mail yury.nastin@kgtu.ru

УДК 551.510.535

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.084

Системный анализ математического моделирования теплопроводности нейтрального газа верхней атмосферы Земли

В.В. Медведев¹, А.Д. Колин¹

¹ Калининградский государственный технический университет

Аннотация. Данная статья является продолжением [1]. В представленной работе приведена постановка задачи математического моделирования теплопроводности на основе основных законов сохранения (плотности, импульса энергии). В уравнении энергии учтены основные динамические и фотохимические источники и стоки тепла в верхней атмосфере Земли. Приведены результаты численного расчета высотного распределения температуры и ее источников и стоков для условий средних широт (45°N), и средней солнечной активности (F_{10.7}150) нейтрального газа. Эти результаты получены на основе решения нелинейных, связанных, «жестких», алгебраических систем. Написан алгоритм и программа на языке Фортран90 адаптированная для использования на любой вычислительной системе. Расчеты проводятся самосогласованно с другими параметрами нейтрального и ионного состава. Показана возможность применения одинакового высотного распределения коэффициента турбулентного перемешивания системы нейтрального газа верхней атмосферы Земли.

Ключевые слова: ионосфера, мезосфера, термосфера, турбулентность, диффузия, вычисления, уравнения, модель, концентрация.

System analysis of mathematical modeling of the thermal conductivity of the neutral gas of the upper atmosphere of the earth

Vladimir V. Medvedev¹, Anton D. Kolin¹

¹ Kaliningrad State Technical University

Abstract. This article is a continuation of [1]. In the presented work, the formulation of the problem of mathematical modeling of thermal conductivity based on the basic conservation laws (density, energy momentum) is given. The energy equation considers the main dynamic and photochemical sources and sinks of heat in the Earth's upper atmosphere. The results of a numerical calculation of the altitude distribution of temperature and its sources and sinks for conditions of middle latitudes (45°N), and average solar activity (F_{10.7}150) of neutral gas are presented. These results are obtained on the basis of solving nonlinear, coupled, "rigid" algebraic systems. An algorithm and a program have been written in Fortran90 adapted for use on any computing system. The calculations are carried out in a self-consistent manner with other parameters of the neutral and ionic composition. The possibility of using the same altitude distribution of the turbulent mixing coefficient of the neutral gas system of the Earth's upper atmosphere is shown.

Keywords: ionosphere, mesosphere, thermosphere, turbulence, diffusion, calculations, equations, model, concentration.

Введение

Тепловой режим нейтрального газа является определяющим фактором влияния на высотное распределения электронной концентрации, которая влияет на условия распространения электромагнитных волн. Знание этих условий обеспечивает надежную радиосвязь подводных и надводных средств морского транспорта. Данная статья является частью общего математического моделирования верхней атмосферы Земли.

Представлена одномерная, нестационарная модель мезосферы и нижней термосферы с учетом молекулярного и турбулентного переноса для области высот 50 - 500 км. Предлагаемая модель позволяет рассчитать пространственно-временное распределение следующих компонент: N₂, O, O₂, O₃, O₂(¹Δ_g), O(¹S), O(¹D), O₂(¹Σ_g⁺), N₂(^v), O₂(^v), H, H₂, OH, H₂O, H₂O₂, N(⁴S), N(²D), NO, NO₂, CO, CO₂, H⁺, O⁺, O₂⁺, O₄⁺, NO⁺, N⁺, N₂⁺, Ne, NO⁺(H₂O)_n (n = 1, 2, 3), H⁺(H₂O)_n (n = 1, 2, 3), Y⁺, СВ₁⁺, СВ₂⁺, O⁻, O₂⁻, CO⁻, CO₂⁻, NO⁻, NO₂⁻, Y⁻, где Y⁺ - суммарная концентрация положительных ионов-связок, Y⁻ - суммарная концентрация отрицательных ионов, N₂(^v), O₂(^v) - колебательно возбужденные молекулярные азот и кислород, Y⁻, Y⁺ суммарная концентрация положительных ионов - связок отрицательных ионов, СВ₁⁺ = Σ_{n=1}³(H₂O)_nNO⁺, СВ₂⁺ = Σ_{n=1}³(H₂O)_nH⁺.

В данном случае смеси газов из нескольких элементов, существует сложная зависимость коэффициентов уравнений от неизвестных функций, их производных и ряда других ионосферно-термосферных параметров, что делает систему нелинейной и связанной. Вследствие этого в настоящее время численные методы являются основным способом нахождения решения для такой системы. Таким образом целью данной работы является самосогласованный расчет нейтрального состава и его температуры при выбранном коэффициенте турбулентного перемешивания.

Уравнения непрерывности и движения нейтрального состава мезосферы и термосферы

Пространственно-временное распределение нейтрального газа мезосферы и нижней термосферы описывается уравнением (1):

$$\vec{\nabla}(n_{\alpha}V_{\alpha}) + \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial t} = \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

где $n_{\alpha} = n_{\alpha}(\vec{r}, t)$ - концентрация частиц α ,

$V_{\alpha} = V_{\alpha}(\vec{r}, t)$ - полная скорость частиц α ,

$k_{\alpha\beta}$ - скорость изменения частиц α в результате взаимодействий с частицами β .

Для расчёта n_{α} необходимо знать V_{α} . Эта скорость должна учитывать турбулентное перемешивание, молекулярную диффузию и макроскопическую

скорость.

Для расчёта пространственно-временного распределения массовых скоростей движения нейтрального состава использовалось уравнение:

$$\frac{\partial \bar{V}_n}{\partial t} + (\bar{V}_n \text{grad}) V_n = \nabla G - \frac{1}{\rho_n} \text{grad } P_n - \frac{1}{\rho_n} \sum_j n_j R_j (\bar{V}_n - V_j) + 2(\bar{V}_n \cdot \Omega) + \nabla \frac{\eta}{\rho_n} \bar{V}_n + \frac{1}{3\rho_n} \text{grad } \eta \text{div} \bar{V}_n,$$

В системе координат, связанной с местной вертикалью, это уравнение записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial t} &= \frac{1}{1+V_y f(\phi)} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial z} (\eta \frac{\partial V_z}{\partial z}) - V_z \rho \frac{\partial V_z}{\partial z} - V_z \sum_j n_j R_j + \right. \\ &2\rho V_y \Omega \cos \phi - \rho \nabla G - \frac{\partial P}{\partial z} \left. \right), \\ \frac{\partial V_x}{\partial t} &= \frac{1}{1+V_y f(\phi)} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial z} (\eta \frac{\partial V_x}{\partial z}) - V_z \rho \frac{\partial V_x}{\partial z} - V_x \sum_j n_j R_j + \right. \\ &2\rho V_y \Omega \sin \phi - \rho \nabla G - \frac{\partial P}{\partial z} \left. \right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} &= \frac{1}{1+V_y f(\phi)} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial z} (\eta \frac{\partial V_y}{\partial z}) - V_z \rho \frac{\partial V_y}{\partial z} - V_y \sum_j n_j R_j - \right. \\ &2\rho V_z \Omega \cos \phi - \rho \nabla G - \frac{\partial P}{\partial y} \left. \right), \end{aligned} \quad (2)$$

Из последних двух уравнений видна зависимость V_y и V_x от V_z .

В системе координат, связанной с местной вертикалью, уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (n_k V_{kz}) - L_k n_k + P_k, \quad (3)$$

где n_k – концентрация k-ой компоненты;

L_k, P_k – члены потерь и образования в фотохимических реакциях;

V_{kz} – скорость частиц.

В области высот мезосферы и нижней термосферы

$$V_{kz} = V_{KM} + V_{KT} + V_z,$$

где V_{KM} – скорость молекулярной диффузии;

V_{KT} – скорость турбулентного перемешивания;

V_z – скорость среднемассового переноса.

Скорость молекулярной диффузии V_{KM} определяется из уравнения движения для нейтральных частиц с учетом сил гравитации, давления и трения между нейтральными компонентами:

$$\frac{1}{\rho_k} \frac{\partial P_k}{\partial z} - \nabla G - \frac{1}{\rho_k} \sum_{j \neq k} n_j R_{kj} (V_{KM} - V_{jM}) = 0, \quad (4)$$

где ρ_k – парциальная плотность;

P_k – парциальное давление, $P_k = n_k T$;

T – температура нейтрального газа;

k – постоянная Больцмана;

V_{KM}, V_{jM} – скорости молекулярной диффузии k-ой и j-ой нейтральных компонент;

$$R_{kj} = S_{kj} \rho_k.$$

Для молекул, подчиняющихся распределению Максвелла

$$S_{kj} = \frac{16}{3} \frac{\mu_{kj}}{m_k} \sigma_{kj}^2 \left(\frac{\pi k T}{\mu_{kj}} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\mu_{kj} = \frac{m_k m_j}{m_k + m_j}, \quad \sigma_{kj} = \frac{\sigma_k + \sigma_j}{2},$$

где σ_k, σ_j – средний диаметр сталкивающихся молекул.

Из уравнения (4) получаем:

$$V_{KM} = \frac{\sum_{k \neq j} S_{kj} n_j V_{jM}}{\sum_{k \neq j} S_{kj} n_j} - D_{KM} \left(\frac{1}{H_k} + \frac{1}{n_k} \frac{\partial n_k}{\partial z} + \frac{(1+\alpha_T)}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

где $D_{KM} = \frac{kT}{(\sum_{k \neq j} S_{kj} n_j) * m_k}$ – коэффициент

молекулярной диффузии k-ой компоненты,

α_T – коэффициент термодиффузии, равный 0,5

только для атомарного водорода H,

$$H_k = \frac{kT}{m_k \nabla G} - \text{шкала высот k-ой компоненты.}$$

Выражение для скорости турбулентного перемешивания задается в виде

$$V_{KT} = - \frac{\rho}{m_k n_k} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right), \quad (6)$$

$$H_T = \frac{kT}{\bar{m} \nabla G},$$

$$\bar{m} = \frac{\sum_k m_k n_k}{\sum_k n_k},$$

$$\rho = \sum_k \rho_k,$$

$$\rho_k = m_k n_k.$$

Подставляя выражения (5) и (6) в (2), получим уравнение следующего вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_k}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{KM} \left(\frac{(1-\beta_n)}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{H_k} \right) - \bar{V}_k \right) n_k + D_{KM} \frac{\partial n_k}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T \frac{\rho}{m_k} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right) \right) - L_k n_k + P_k, \\ \bar{V}_k &= \frac{\sum_{k \neq j} S_{kj} n_j V_{jM}}{\sum_{k \neq j} n_j S_{kj}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где \bar{V}_k – вертикальная проекция среднемассовой скорости,

$\beta_n = 0.5$ (для H), для остальных 0.

С учетом температурных изменений, вызванных турбулентным перемешиванием, выражение (7) можно записать в виде

$$V_{KT} = - D_T \left(\frac{\partial n_k}{\partial z} \right) \frac{1}{n_k} + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \frac{1}{T} + \frac{1}{H}. \quad (8)$$

Тогда уравнение непрерывности (7) переписывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_k}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{KM} \frac{\partial n_k}{\partial z} + \left(D_{KM} \left(\frac{1}{H_k} + \frac{(1-\beta_n)}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \bar{V}_k \right) n_k \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T \frac{\partial n_k}{\partial z} + D_T \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) n_k \right) - L_k n_k + P_k. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение теплопроводности нейтрального газа

Учитывая динамические (турбулентность, массовый перенос, конвекция), а так же фотохимические процессы для рассматриваемого интервала высот от 50 до 500 км уравнение теплового баланса можно записать в виде:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^k \rho_i c_{pi} U_i \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{dP}{dt} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho c_p K_h \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) \right] - \rho c_p W \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma \right) + \rho \varepsilon_d + Q, \quad (10)$$

где $\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + V_{nz} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$;

c_p – теплоёмкость при постоянном давлении $\left(3.5 \frac{R}{M} \right)$;

ρ_i – плотность, $\rho_i = m_i n_i$; m_i ,

n_i – масса и концентрация i-той компоненты нейтрального газа;

U_i – скорость молекулярной диффузии;

K_r – коэффициент теплопроводности;

P – давление, $P = \sum n_i k T$;

K_h – коэффициент турбулентной температуропроводности;

$\Gamma = g / c$ – адиабатический градиент;

g – ускорение свободного падения;

ω – упорядоченная вертикальная скорость (среднемассовая скорость);

ε_d – скорость диссипации турбулентной энергии;

Q – скорость нагрева и охлаждения нейтрального газа ;

$$R_{fc} = 0.3 - 0.6;$$

$$\varepsilon_d = \frac{K_h g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_v} \right) \frac{1-R_{fc}}{R_{fc}},$$

$$K_r = \frac{\sum_i B_i n_i T_n^{b_i}}{\sum_i n_i(z)}.$$

В работе приняты во внимание следующие физические процессы:

1. нагрев за счет фотоионизации нейтральных компонент Q_i ;
2. нагрев за счет фотодиссоциации O_3 и O_2 в континууме и полосах Шумана-Рунге Q_{SR} ;
3. нагрев за счет фотоэлектронов Q_f ;
4. нагрев за счет рекомбинации кислородных составляющих Q_H ;
5. нагрев за счет диссоциативной рекомбинации (химическая энергия) Q_R ;
6. нагрев за счет диссипации турбулентной энергии;
7. охлаждение за счет инфракрасного излучения молекул CO_2 на длине волны 15 мкм L_{CO_2} ;
8. охлаждение за счет излучения O на длине волны 63 мкм L_O ;
9. охлаждение за счет излучения NO на длине волны 5.3 мкм L_{NO} ;

1. Нагревание за счет поглощения ионизирующего ($\lambda \approx 125$ нм) излучения Солнца происходит со скоростью Q_i .

$$Q_i = \sum_{k,j,\lambda < 1250} \int_{\lambda} \delta_{ij}^k n_j(z) (\varepsilon_{\lambda} - \varepsilon_j^i - \varepsilon_{kj} P_{kj\lambda}) \cdot \frac{F_{\lambda\infty}}{e_{\lambda}} e^{-\tau_{\lambda}(z)} d\lambda, \quad (11)$$

$\sum_i \delta_{ij}^k$, $\sum_i \delta_{ij}^{\alpha}$ - сечения фотоионизации и поглощения соответственно, в интервале (λ , $\lambda + d\lambda$); ε_j^i - порог ионизации i -й компоненты;

ε_{kj} - энергия перехода из j -го состояния в возбужденное состояние;

$P_{kj\lambda}$ - вероятность производства k -го возбужденного состояния в процессе фотоионизации j -й компоненты фотоном;

$Ch(x)$ - функция Чепмена;

$F_{\lambda\infty}$ - поток на верхней границе атмосферы.

2. Нагревание за счет поглощения энергии кислородом и озоном

$$Q_{SR} = \sum_i n_i(z) \int_{\lambda} \delta_{i\lambda} (e_{\lambda} - e_{id} - e_{i\lambda}) F_{\lambda\infty} e^{-\tau_{\lambda}} d\lambda, \quad (12)$$

где $\delta_{i\lambda}$ - сечение поглощения молекулами O_2 в континууме Шумана-Рунге и молекулами озона в слое ниже 70 км;

$n_i(z)$ - концентрация O_2 (или O_3) на высоте z ;

e_{λ} - квант излучения;

e_{id} - энергия диссоциации O_2 (или O_3), равная 5,1 эВ (1,04 эВ);

$e_{i\lambda}$ - энергия возбуждения состояния $O(^1D)$, равная соответственно 1,96, 0,98, 1,63 эВ для состояний $O_2(^3P - ^1D)$, $O_2(^3\Sigma_g - ^1\Delta_g)$, $O_2(^3\Sigma_g - ^1\Sigma_g^+)$; при этом учитываются столкновения между $O(^1D)$ и тремя нейтральными компонентами O , O_2 и N_2 ; A_1D ,

A_b - коэффициенты Эйнштейна для $O(^1D)$ и

$O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $A_1D^{-1} = 110$ с, $A_b^{-1} = 145$ с; $k_j^{O(^1D)}$,

$k_j^{O_2(b)}$ - коэффициенты тушения, $k_j^{O(^1D)} = 1.6 \cdot 10^{-13}$,

$5.0 \cdot 10^{-11}$, $5.0 \cdot 10^{-11}$ см²·с⁻¹, $k_j^{O_2(b)} = 1.0 \cdot 10^{-15}$, $9.0 \cdot 10^{-16}$, $1.5 \cdot 10^{-15}$ см²·с⁻¹,

k_b - константы скорости образования $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $k_b = 1.4 \cdot 10^{-15}$ см³·с⁻¹.

3. Скорость нагрева фотоэлектронами в процессе ионизации

$$Q_f = 1.6 \cdot 10^{-12} \left(1 + 9 \frac{z-120}{480} \right) \sum_{j=1}^3 q_j, \quad (13)$$

$z \geq 100$ км,

где q_j - скорость ионообразования.

4. Важным источником нагревания нижней

термосферы является процесс рекомбинации кислородных составляющих. Скорость нагрева обусловлена рекомбинационными процессами

$$Q_H = \sum_k n_i n_j a_k (\Delta E_k), \quad (14)$$

где n_i , n_j - концентрации реагирующих компонент; a_k - коэффициенты реакций;

ΔE_k - доля энергии в результате реакций.

В наших расчетах учитывался нагрев за счет следующих химических реакций рекомбинации кислородных составляющих:

$$\Delta E_1 = 5.11 \text{ эВ}, \quad \Delta E_2 = 1.04 \text{ эВ},$$

$$\Delta E_3 = 4.07 \text{ эВ},$$

$$\Delta E_4 = 3.0 \text{ эВ}, \quad \Delta E_5 = 1.5 \text{ эВ},$$

$$\Delta E_6 = 2.1 \text{ эВ},$$

$$\Delta E_7 = 0.6 \text{ эВ}, \quad Q = \sum_i \sum_j k_i \cdot [N_i] \cdot [N_j].$$

5. Энергия, переходящая в тепло в результате диссоциативной рекомбинации

$$Q_R = \sum_k \alpha_k n_k^+(z) N_e(z) \Delta E_k, \quad (15)$$

где α_k - скорости реакций (таб. 2.3);

$n_k^+(z)$ - концентрации ионов O_2^+ , NO^+ , N_2^+ ;

N_e - концентрация электронов;

ΔE_k - энергия, выделяемая в результате реакции;

$\Delta E_{O_2^+} = 3.69$ эВ, $\Delta E_{NO^+} = 1.31$ эВ,

$\Delta E_{N_2^+} = 3.14$ эВ.

6. Влияние турбулентности описывается уравнением (нагрев)

$$\rho e_d = \rho e_d \frac{1-R_{fc}}{R_{fc}} = \rho \frac{K_h g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right) \left(\frac{1-R_{fc}}{R_{fc}} \right). \quad (16)$$

где R_{fc} - критическое динамическое число Ричардсона, определяющее соотношение нагревания и охлаждения термосферы турбулентностью (в наших расчетах 0.3 - 0.6).

Величину ε_d можно оценить по экспериментальным данным коэффициента турбулентной диффузии, используя закон Ричардсона-Обухова:

$$K_h = \alpha \varepsilon_d^{1/3} l^{4/3}, \quad \alpha \approx 0.1,$$

где l - характеристический масштаб, равный некоторой доле шкалы высоты H .

7. Охлаждение термосферы за счет инфракрасного излучения в колебательно-вращательных полосах молекул CO_2

$$L_{CO_2} = -1,33 \cdot 10^{-13} \cdot e^{-960/T} \cdot [CO_2]$$

$$\sum_M k^{(M)} [M] \cdot F(\tau(\lambda)), \quad [\text{Эрг/см}^3 \text{ с}], \quad (17)$$

$$F(\tau, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{\lambda L(\tau)}{(1-\lambda + \frac{1}{2}\lambda L(\tau))}$$

$$\lambda = A_{10} / (A_{10} + \sum_M k^{(M)} [M]),$$

$$\tau = 6.4 \cdot 10^{-15} [CO_2] \cdot H \cdot CO_2,$$

где A_{10} - вероятность спонтанного излучения $\sim 13,35$ с⁻¹;

$k^{(M)}$ - константа скорости дезактивации этого уровня в столкновениях с молекулами O , O_2 , N_2 ;

τ - приведенная оптическая атмосферы для излучения CO_2 в полосе 15 мкм на данной высоте;

H_{CO_2} - высота однородной атмосферы;

$L(\tau)$ - функция, учитывающая поглощение излучения в полосе: $\tau \rightarrow 0$ (оптически тонкая среда),

$L(\tau) \rightarrow 1$; $\tau \rightarrow \infty$ (оптически плотная среда) $L(\tau) \sim \tau^{-1} \rightarrow 0$.

8. Охлаждение газа за счет эмиссии O на длине волны 63 мкм

$$L_0 = [O] \frac{1.67 \cdot 10^{-18} \exp(-228/T_n)}{1 + 0.6 \exp(-228/T_n) + 0.2 \exp(-328/T_n)} \text{ erg cm}^{-3} \quad (18)$$

9. Скорость охлаждения за счёт излучения NO на длине волны 5,3 мкм записывается в виде:

$$L_{NO} = h\nu[NO] \cdot A_{10} \cdot \frac{g_{\downarrow}}{g_0} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \cdot W,$$

$$\text{где } W = \frac{\sum_i K_i [n_i]}{\sum_i K_i [n_i] + A_{10}},$$

$$A_{10} = 13,3 \text{ с}^{-1},$$

K_i – коэффициенты реакций дезактивации NO с O, O₂, N₂.

В большинстве случаев коэффициент турбулентной диффузии задается эмпирическим выражением, например:

$$DT(z) = DTM \exp[-s_1 (z - z_m)^2],$$

$$z \geq z_m,$$

$$DT(z) = (DTM - D_0) \exp[-s_2 (z - z_m)^2] + D_0 \exp[s_3 (z - z_m)],$$

В наших расчетах этот коэффициент рассчитывался по приведенным выше формулам путем варьирования параметров s_1, s_2, s_3

Результаты расчетов

Вычислительный эксперимент был проведен для средней солнечной активности $F_{10,7}(144)$, средней широты $N45^\circ$

Были проведены численные расчёты для области высот 50 – 500 км с шагом интегрирования по времени $\tau = 60$ С и по высоте $h = 2$ км. Результаты расчетов представлены на рис. 1-5

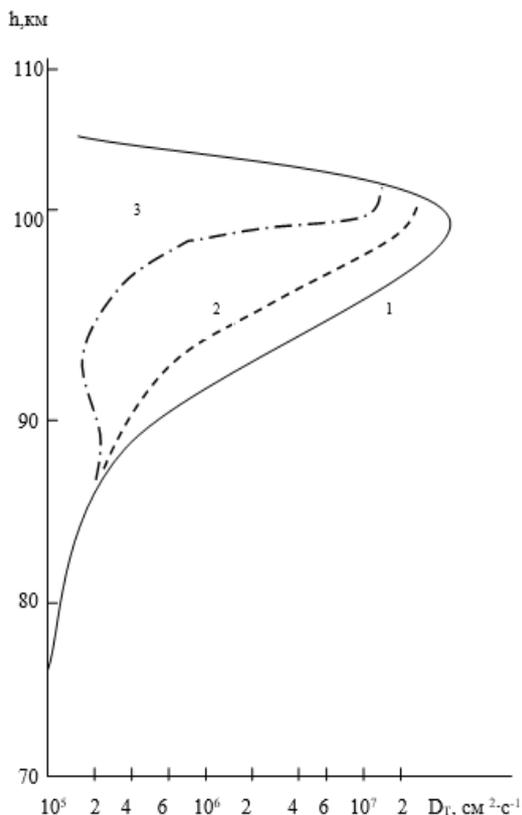


Рис. 1. Коэффициент турбулентного перемешивания.

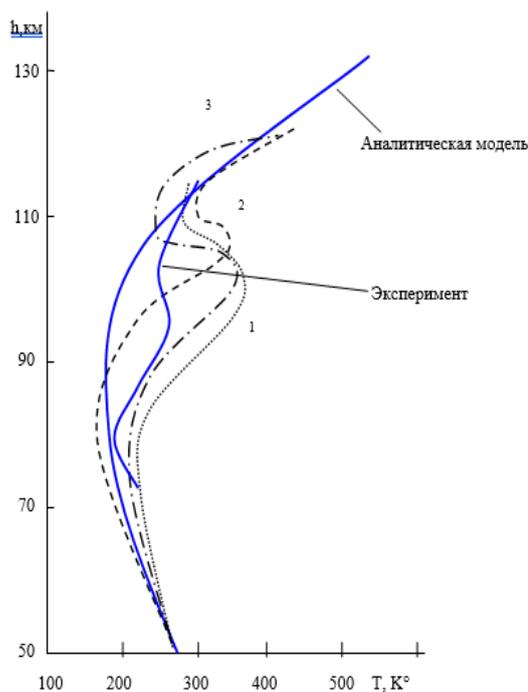


Рис. 2. Рассчитанные 1-3 T_n для различных D_T

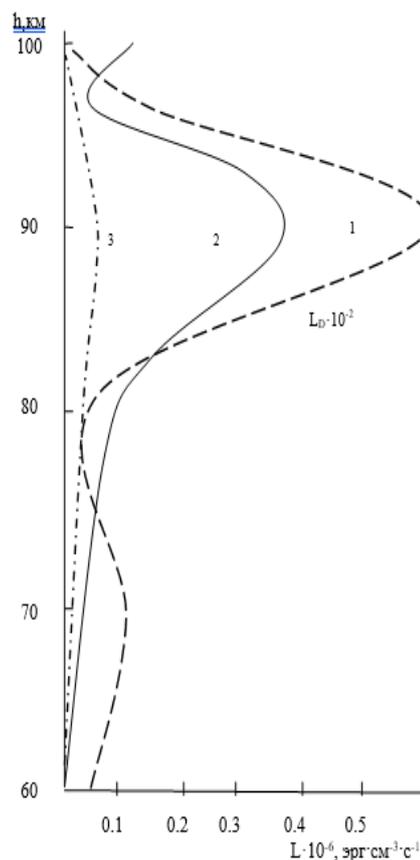


Рис. 3. Скорость выхолаживания, обусловленная турбулентностью.

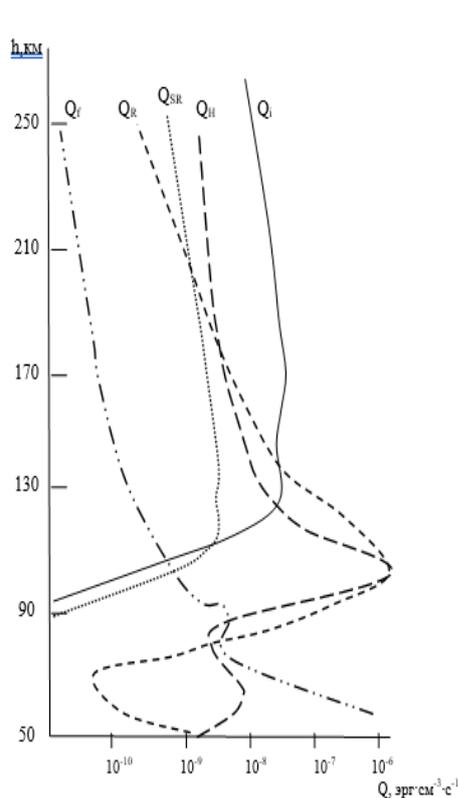


Рис. 4. Скорости нагрева.

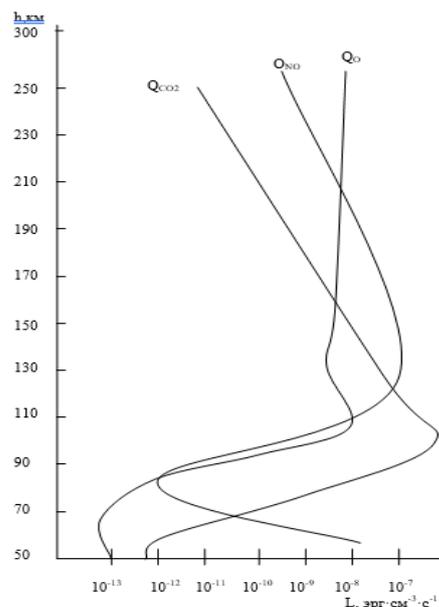


Рис. 5. Скорости охлаждения атмосферы

Заключение

В целом полученные результаты не противоречат имеющимся теоретическим предположениям и экспериментальным данным о высотном распределении температуры нейтрального газа.

Литература

1. Medvedev V.V. Mathematical Model for the Processes Ionosphere and Upper Atmosphere / Medvedev V.V., Pyalov D.I., Zamyatina O.V. // AIS-2010: Atmosphere, ionosphere, safety: book of Abstracts; Supported by Russian Foundation of Basic Research. - Kaliningrad, 2010. - pp. 225-226.
2. Medvedev V.V. Mathematical modelling for the processes mesosphere, thermosphere and ionosphere / Medvedev V.V., Zamyatina O.V. // Physics of Auroral Phenomena 34th Annual Seminar Polar Geophysical Institute. - Apatity, 2011. - p. 49.
3. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Тимофеева И.В., Результаты численного расчета высотного распределения кислородных компонентов верхней атмосферы Земли/ В.В. Медведев, В.Е. Еремичева, И.В. Тимофеева //Морские интеллектуальные технологии 2017. №3 Т. 1. С. 163-167.
4. Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д., Математическое моделирование реакций нижней области ионосферы для возмущенных условий//В.В. Медведев, В.Е. Еремичева, А.Д. Колин //Морские интеллектуальные технологии 2018. №4 Т.3. С. 154-158.

References

1. Medvedev V. Mathematical Model for the Processes Ionosphere and Upper Atmosphere / Medvedev V., Pyalov D., Zamyatina O. // AIS-2010: Atmosphere, ionosphere, safety: book of Abstracts; Supported by Russian Foundation of Basic Research. - Kaliningrad, 2010. - pp. 225-226.
2. Medvedev V. Mathematical modelling for the processes mesosphere, thermosphere and ionosphere / Medvedev V., Zamyatina O. // Physics of Auroral Phenomena 34th Annual Seminar Polar Geophysical Institute. - Apatity, 2011. - p. 49.
3. Medvedev V, Eremicheva V, Timofeeva I, Numerical calculation of the altitude distribution of oxygen components of the Earth's upper atmosphere / V. Medvedev, V. Eremicheva, I. Timofeeva // Marine Intellectual Technologies 2017. №3 Т. 1. p. 163-167.
4. Medvedev V, Eremicheva V, Kolin A, Mathematical modeling of reactions of the lower region of the ionosphere for disturbed conditions // V. Medvedev, V. Eremicheva, A. Kolin // Marine Intellectual Technologies 2018. №4 Т.3. p. 154-158.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Васильевич Медведев, доктор физико – математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Vladimir V. Medvedev, Dr. Sci. (Phys & Math), Professor of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Антон Дмитриевич Колин, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: yojik14@gmail.com

Anton D. Kolin, Senior Lecturer of Department of Informatics and Information technologies, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: yojik14@gmail.com

Нагрузочные характеристики трехплунжерных насосов для пожаротушения распыленной морской водой

В.А. Наумов¹, Н.Л. Великанов², А.В. Тришина¹

¹Калининградский государственный технический университет, ²Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Аннотация. Цель статьи – получить эмпирические зависимости для характеристик трехплунжерных противопожарных насосов (ТПН), необходимые для автоматизации расчетов систем тушения пожаров на судах с применением распыленной морской воды. Задачи исследования: проверка непротиворечивости данных испытаний; определение расчетных зависимостей производительности ТПН, к.п.д., затраченной мощности от давления. Проведенный анализ результатов испытаний ТПН подтвердил возможность использования предложенных зависимостей в инженерных расчетах. Данные измерений удовлетворительно согласуются с результатами расчетов, за исключением к.п.д. Отклонение экспериментальных точек от эмпирических зависимостей, скорее всего, связано с занижением значений затраченной мощности на испытаниях при небольших давлениях. Предложено для оценки к.п.д. использовать ранее полученную типовую зависимость. Построены графики для характеристик насоса NP25/41-170S. Пример расчета рабочей точки насосной установки с использованием приближенной гидравлической характеристики водяной пожарной системы судна показал высокую эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: противопожарный трехплунжерный насос, нагрузочные характеристики, аппроксимация, производительность давление, мощность, коэффициент полезного действия.

Load characteristics of three-plunger pumps for spray seawater fire-fighting

Vladimir A. Naumov¹, Nikolay L. Velikanov², Anzhelika V. Trishina¹

¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation ²Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation

Abstract. The purpose of the article is to obtain empirical dependences for the characteristics of three-plunger fire-fighting pumps (TFP), which are necessary for automating calculations of fire extinguishing systems on ships using sprayed seawater. Research objectives: checking the consistency of test data; determining the calculated dependences of the TFP performance, efficiency, power expended on pressure. The analysis of the TFP test results confirmed the possibility of using the proposed dependencies in engineering calculations. The measurement data are in satisfactory agreement with the results of calculations, with the exception of efficiency. The deviation of experimental points from the empirical dependences is most likely due to an underestimation of the power consumed during tests at low pressures. It is proposed to use the previously obtained typical dependence to estimate the efficiency. Graphs are plotted for the characteristics of the NP25/41-170S pump. An example of calculating the working point of a pumping unit using the approximate hydraulic characteristics of the ship's water fire system showed the high efficiency of the proposed methods.

Key words: fire-fighting three-plunger pump, load characteristics, approximation, performance, pressure, power, efficiency.

Введение

Важность водяных систем распыления воды для пожаротушения на судах отмечается в [1, 2]. Реактивная среда адаптивного пожарного лафетного ствола, как правило, представляет собой смесь воздуха и воды [3]. Во время работы эквивалентная жесткость струйной жидкости периодически или случайным образом колеблется из-за пульсации давления струйной системы и внешних факторов, таких как ветер, таким образом, динамическое поведение адаптивной системы имеет типичные нелинейные характеристики. В работе [3] на основе предположения о том, что эквивалентная жесткость жидкости колеблется по гармоническому закону, создана нелинейная динамическая модель струйной системы, которая решается многомасштабным методом. Проанализировано влияние расчетных параметров, таких как частота пульсаций жидкости, скорость подачи воздуха и давление жидкости, на амплитуду резонанса струйной системы. Результаты показывают, что существование частоты пульсаций жидкости увеличивает резонансный частотный диапазон струйной системы. Что касается влияния

конструктивных параметров на динамические характеристики струйной системы, то с точки зрения изменения амплитуды наибольшее влияние на основной резонанс оказывает скорость пропуска воздуха, а на комбинированный резонанс-частота пульсаций жидкости. Исследование [3] связано с теоретическим обоснованием динамической оптимизации адаптивной системы.

В статье [4] разрабатывается новая система водяного тумана. Система оснащена камерами наблюдения, используемыми для определения координат пожара, и туманообразующими струйными вентиляторами, используемыми для подавления пожара. Передняя часть струйных вентиляторов снабжена соплами, которые распыляют воду вперед через вентиляторы, создавая тем самым туман и продвигая его к месту пожара. Туман, выходящий из вентиляторов, снижает температуру окружающей среды, вытесняет кислород, охлаждает поверхность горючих материалов и ослабляет радиационные и конвективные эффекты. Моделирование предлагаемой системы показывает низкую скорость тепловыделения, снижение дыма и токсичных паров,

увеличение скорости вентиляции туннеля и улучшение видимости [4].

Математическое моделирование противопожарных систем невозможно без аппроксимации нагрузочных характеристик используемых насосов. Ранее проводились исследования характеристик центробежных судовых противопожарных насосов. Анализ и аппроксимация рабочих характеристик таких насосов по данным производственных испытаний опубликован (см. [5, 6] и библи. в них). Тогда как математическое описание работы плунжерных судовых насосов, практически отсутствует.

Компания Креолайн проектирует и выпускает аппараты высокого давления для пожаротушения распыленной водой [6] на базе трехплунжерных насосов Speck Triplex [7]. Такой аппарат показан на рис. 1.



Рис. 1. Насосная установка высокого давления для пожаротушения распыленной водой [7]

Стандартная комплектация насосного агрегата включает трехплунжерный противопожарный насос (ТПН) высокого давления, для перекачивания воды и близких по свойствам водных растворов; манометр для измерения давления на выходе насоса, асинхронный электродвигатель, предназначенный для работы в условиях пожара; предохранительный и разгрузочный клапаны для предотвращения давления выше допустимого (см. рис. 1).

В данной статье рассмотрены нагрузочные характеристики трехплунжерных насосов высокого давления Speck Triplex. Для анализа и аппроксимации характеристик ТПН использована ранее разработанная авторами методика [9-12].

1. Аппроксимация нагрузочных характеристик

Необходимые для исследования исходные данные были получены от производителя трехплунжерных насосов, предназначенных для морской воды [8]. В табл. 1 приведены номинальные значения подачи Q_H , максимальные давления на выходе P_M , затраченной мощности N разных моделей насосов NP25-S (литера S означает Sea Water) при наибольшей допустимой частоте вращения кривошипа $n = 1450 \text{ об/мин}$ ($\omega = 151,8 \text{ с}^{-1}$).

Для насосов из табл. 1 в [6] имеются полученные в результате испытаний зависимости затраченной мощности от давления. Пример таких нагрузочных характеристик при разных значениях частоты

вращения кривошипа приведен на рис. 2 для насоса NP25/41-170S.

Таблица 1

Параметры ТПН высокого давления для морской воды [6]

Модель	Q_H , дм ³ /мин	P_M , МПа	N , кВт
NP25/30-200S	31,1	200	12,2
NP25/38-180S	37,3	180	13,2
NP25/41-170S	40,4	170	13,5
NP25/50-150S	48,4	150	14,3
NP25/70-120S	69,7	120	16,5

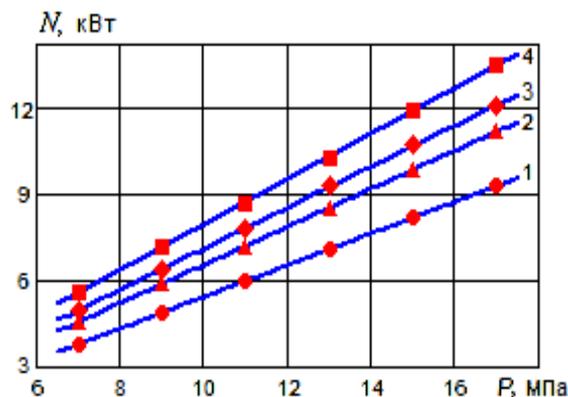


Рис. 2. Зависимость затраченной мощности от давления на выходе насоса NP25/41-170S при разной частоте: 1 – $n = 1000 \text{ об/мин}$; 2 – 1200 об/мин ; 3 – 1300 об/мин ; 4 – 1460 об/мин . Точки – опытные данные [6]

По результатам испытаний, приведенным в [6], в исследованной области P (от 7 до 17 МПа) затраченная мощность линейно зависит от давления на выходе насоса по формуле (1):

$$N = f_1(P, \omega) = Q_U(\omega) \cdot P, \quad Q_U = b_{10} + b_{11} \cdot \omega, \quad (1)$$

где Q_U – идеальное значение подачи, которое рассчитывается как частное от деления затраченной мощности на давление.

По данным [6] зависимость подачи в номинальном режиме от давления также линейная, может быть рассчитана по формуле (2):

$$Q_H = b_{20} + b_{21} \cdot \omega, \quad (2)$$

Коэффициенты в зависимостях (1)-(2) были найдены методом наименьших квадратов. Для насоса NP25/41-170S они приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты в (1)-(2) насоса NP25/41-170S

Номер	b_{10}	b_{11}	ϵ , %
(1)	0,0149	-0,00333	0,57
(2)	0,00511	0,00446	0,01

По рис. 2-3 и средней квадратичной относительной погрешности ϵ в табл. 2 видно, что результаты расчетов хорошо согласуются с опытными данными.

В [8] приведены значения подачи только в номинальном режиме. Полагаем, как и в [11, 12], что в указанном режиме давление P_H составляет примерно 80% от максимального значения. Для насоса NP25/41-170S можно принять $P_H \approx 13,6 \text{ МПа}$.

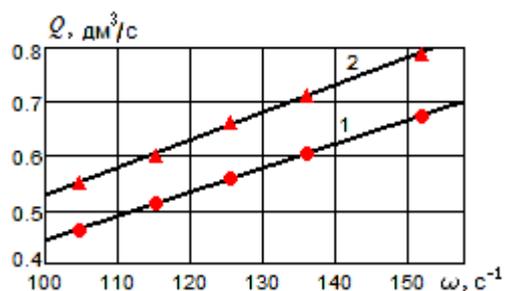


Рис. 3. Зависимость подачи насоса NP25/41-170S от угловой скорости кривошипа: 1 – номинальная; 2 – идеальная. Точки – опытные данные [6], линии – расчет по формулам (1)-(2)

Введем безразмерное давление $p=P/P_H$. Тогда зависимость подачи от давления рассчитывается по формуле (3) [12]:

$$q(p) \equiv \frac{Q}{Q_H} = \frac{1 - (1 - \eta_0) \cdot p}{\eta_0}, \text{ при } p \leq 1, \quad (3)$$

где η_0 объемный КПД при номинальном режиме.

Если предположить, что в номинальном режиме, как и в [6], объемный КПД ТПН $\eta_0 = 0,93$, то из (3) следует формула (4):

$$Q = f_2(P) = Q_H(\omega) \cdot \left(1,075 - 0,075 \cdot \frac{P}{P_H} \right). \quad (4)$$

На рис. 4 показана рассчитанная по формуле (4) зависимость подачи насоса NP25/50-150 от давления при различных значениях частоты. Заметим, что при давлении $P > P_H$ подача ТПН заметно падает.

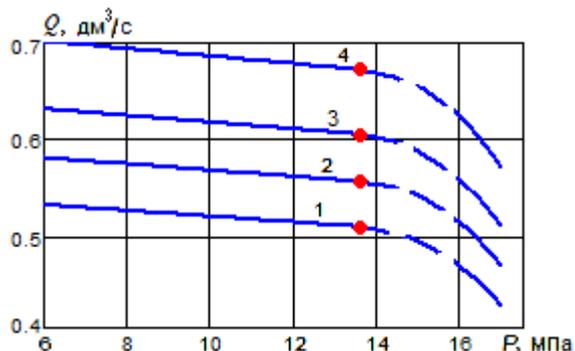


Рис. 4. Зависимость подачи насоса NP25/41-170S от давления при разной частоте: 1 – $n = 1000$ об/мин; 2 – 1200 об/мин; 3 – 1300 об/мин; 4 – 1460 об/мин. Точки – опытные данные [8], линии – расчет по формуле (4)

2. Коэффициент полезного действия

Энергетическая эффективность работы насоса определяется значением его КПД в рабочей точке. Рассчитаем КПД ТПН по формуле (5), используя опытные данные [6]:

$$\eta = 100 \cdot N_p / N, \quad N_p = P \cdot Q, \quad (5)$$

где N_p – полезная мощность ТПН.

На рис. 5 результаты расчета по (5) показаны линией 1. По данным [8] получается, что с уменьшением давления на выходе КПД ТПС монотонно растет. Что противоречит физическому смыслу. Скорее всего, причиной аномального поведения кривой 1 при уменьшении значений P .

является неточное определение затраченной мощности в указанной области. Аналогичная ошибка была обнаружена авторами (см. [8]) в результатах испытаний ОАО «Свесский насосный завод» [13].

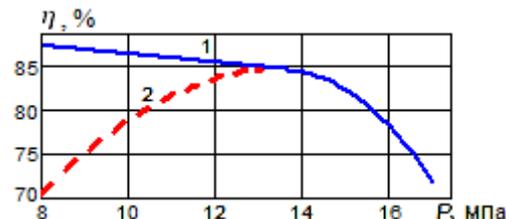


Рис. 5. Расчет КПД насоса NP25/41-170S при $n = 1300$ об/мин: 1 – по данным [6]; 2 – по формуле (6)

В [11, 12] было установлено, что при уменьшении давления заметно ниже номинального график затраченной мощности отклоняется вверх от линейной зависимости. В результате КПД ТПС можно оценить по приближенной формуле (6):

$$\eta \approx \eta_H \cdot \frac{P}{P_H} \cdot \left(2,0 - \frac{P}{P_H} \right). \quad (6)$$

где η_H – значение КПД в номинальном режиме. Для насоса NP25/41-170S $\eta_H = 84,8\%$ и, практически, не зависит от частоты.

3. Рабочая точка насосной установки

Пусть зависимость давления от расхода для системы тушения пожара судна имеет вид (7):

$$F(Q) = P_c + \alpha \cdot Q^2, \quad (7)$$

где P_c – статическое давление, α – размерный коэффициент гидравлического сопротивления.

Используя полученные аналитические выражения, давление в рабочей точке P_0 находим решением уравнения $F(f_2(P_0)) = P_0$. Далее остается рассчитать подачу и КПД по формулам (4) и (6). Так, в рассматриваемом примере в первом случае получим: $P_0 = 5,28$ МПа; $Q_0 = 0,533$ дм³/с; $\eta = 53,0\%$; для 2-го $P_0 = 10,16$ МПа; $Q_0 = 0,520$ дм³/с; $\eta = 79,4\%$; для 3-го $P_0 = 14,97$ МПа; $Q_0 = 0,496$ дм³/с; $\eta = 83,9\%$.

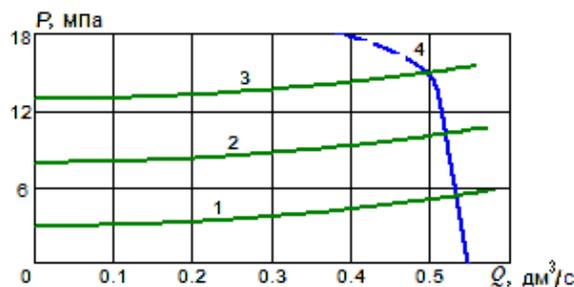


Рис. 6. Определение рабочей точки насосной установки при: 1 – гидравлическая характеристика сети (7) при $P_c = 3$ МПа; 2 – $P_c = 8$ МПа; 3 – $P_c = 13$ МПа; 4 – нагрузочная характеристика ТПН NP25/41-170S

Заключение

Выполнен анализ результатов испытаний трехплунжерных насосов NP25 для морской воды, построены аналитические зависимости подачи и КПД от давления. Для аппроксимации зависимости

затраченной мощности от давления была использована линейная функция. Коэффициенты в предложенных зависимостях найдены методом наименьших квадратов.

По результатам испытаний получается, что КПД ТПС монотонно растет при снижении давления ниже номинального значения, что противоречит физическому смыслу. Выдвинута гипотеза, что результаты измерения затраченной мощности при

сравнительно небольших давлениях содержат заниженные значения. Предложено оценивать КПД ТПС по ранее полученной типовой зависимости.

Приведена методика расчета рабочей точки насосной установки на примере гидравлической характеристики водяной пожарной системы судна - зависимости потребного давления от расхода воды в сети.

Литература

1. Радзиевский С. И., Хнычкин В. М. Пожаробезопасность и противопожарная защита кораблей. Ленинград: Судостроение, 1987. 200 с.
2. Hansen R.L., Back G.G. Water spray protection of machinery spaces. Fire technology. 2001. V. 37. I. P. 317-326.
3. Yuan X.M., Zhu X., Wang C., Zhang L.J. Research on dynamic modeling and parameter influence of adaptive gun head jet system of fire-fighting monitor. IEEE ACCESS. 2020. V. 8. P. 121182-121196.
4. Sarvari A., Mazinani S.M. A new tunnel fire detection and suppression system based on camera image processing and water mist jet fans. HELIYON. 2019. V. 5. I. 6. Article number: e01879.
5. Хитрых Д.П., Маламанов С.Ю., Павловский В.А. К вопросу построения имитационной модели водяной системы пожаротушения судна // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2(44), Т.1. С. 210-215.
6. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Тришина А.В. Анализ характеристик центробежных судовых противопожарных насосов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4(46), Т.4. С. 166-170.
7. Компания Креолайн. Насосная установка высокого давления для распыления водой в пожаротушении [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <http://www.kreoline.ru/blog/469-nasosnaya-ustanovka-dlya-raspyleniya-vodoj-vysokogo-davleniya.html> (дата обращения: 05.06.2020).
8. Трехплунжерный насос высокого давления NP25/41-170 [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <http://www.speck-triplex.ru/index.php?option=content&task=view&id=186> (дата обращения: 05.06.2020).
9. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. Characteristics of plunger pumps. Russian Engineering Research. 2018. V. 38, No. 6. P. 428-430.
10. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Расчет характеристик трехплунжерных насосов // Известия вузов. Машиностроение. 2018. № 11. С. 60-67.
11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Регулирование работы трехплунжерного насоса // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 52-56.
12. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Моделирование технических характеристик трехплунжерных насосов высокого давления // Вестник машиностроения. 2020. № 7. С. 16-18.
13. ОАО «Свесский насосный завод». Трехплунжерные насосы [Электронный ресурс]. Режим доступа – свободный: <http://snz-nasos.ru/down/swessa2.pdf> (дата обращения: 01.05.2018).

References

1. Radzievskij S.I., Hnychkin V.M. Pozharobezopasnost' i protivopozharnaya zashchita korablej [Fire safety and fire protection of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1987. 200 s.
2. Hansen R.L., Back G.G. (2001) Water spray protection of machinery spaces. Fire technology. V. 37. I, pp. 317-326.
3. Yuan X.M., Zhu X., Wang C., Zhang L.J. (2020) Research on dynamic modeling and parameter influence of adaptive gun head jet system of fire-fighting monitor. IEEE ACCESS. V. 8. P. 121182-121196.
4. Sarvari A., Mazinani S.M. (2019) A new tunnel fire detection and suppression system based on camera image processing and water mist jet fans. HELIYON. V. 5. I. 6. Article number: e01879.
5. Hityrh D.P., Malamanov S.YU., Pavlovskij V.A. (2019) K voprosu postroeniya imitacionnoj modeli vodyanoj sistemy pozharotusheniya sudna [Regarding the issue of designing the simulation model of water fire extinguishing system]. Morskije intelektual'nye tekhnologii. No. 2(44), V.1. S. 210-215.
6. Naumov V.A., Velikanov N.L., Trishina A.V. (2019) Analiz harakteristik centrobezhnyh sudovyh protivopozhar-nyh nasosov [Analysis of characteristics of centrifugal ship fire-fighting pumps]. Morskije intelektual'nye tekhnologii. No. 4(46), V.4. S. 166-170.
7. Kompaniya Kreolajn. Nasosnaya ustanovka vysokogo davleniya dlya raspyleniya vodoj v pozharotushenii [Creoline Company. High-pressure pumping unit for water spraying in fire fighting]. [Electronic resource]. URL: Rezhim dostupa – svobodnyj: <http://www.kreoline.ru/blog/469-nasosnaya-ustanovka-dlya-raspyleniya-vodoj-vysokogo-davleniya.html> (data: 05.06.2020).
8. Trekhplunzhernyj nasos vysokogo davleniya NP25/41-170 [Three-plunger-high pressure pump NP25/41-170]. [Electronic resource]. URL: <http://www.speck-triplex.ru/index.php?option=content&task=view&id=186> (data: 05.06.2020).
9. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. (2018) Characteristics of plunger pumps. Russian Engineering Research. V. 38, No. 6, pp 428-430.
10. Velikanov N.L., Naumov V.A. (2018) Raschet harakteristik trekhplunzhernyh nasosov [Calculation of characteristics of three-plunger-pumps]. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. No. 11. S, 60-67.
11. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. (2020) Regulirovanie raboty trekhplunzhernogo nasosa [Regulation of the three-plunger pump operation]. Vestnik mashinostroeniya. No. 6. S, 52-56.

12. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. (2020) Modelirovanie tekhnicheskikh harakteristik trekhplunzhernyh nasosov vysokogo davleniya [Modeling of technical characteristics of high-pressure three-plunger pumps]. Vestnik mashinostroeniya. 2020. No. 7, pp. 16-18.
13. ОАО "Svesskiy nasosnyj zavod". Trekhplunzhernye nasosy [JSC "Svessky Pump Plant". Three-plunger pumps]. [Electronic resource]. URL: <http://snz-nasos.ru/down/swessa2.pdf> (data: 01.05.2018).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Аркадьевич Наумов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: van-old@mail.ru

Vladimir A. Naumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of The Water Resources & Water Use Department, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: van-old@mail.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

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

Анжелика Владимировна Тришина, аспирант, Калининградский государственный технический университет 236022, Калининград, Советский пр., 1, e-mail: anz7898@yandex.ru

Anzhelika V. Trishina, PhD student, Kaliningrad State Technical University, Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, e-mail: anz7898@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 639.2.081.117:51-74

DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.086

Математическая модель погружения нижней подборы кошелькового невода на рабочую глубину

Н.Л. Великанов^{1,2}, О.В. Шарков^{1,2}¹Калининградский государственный технический университет
²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. Кошельковый лов рыбы по распространённости занимает второе место после тралового. Однако, теория кошелькового лова, в частности механика кошелькового невода, постоянно совершенствуется. Этому способствуют натурные испытания. В данной работе используются результаты замеров параметров погружения нижней подборы кошелькового невода проекта 1793, полученных при замерах на промысле «МариНПО». Предложена модель погружения, в которой учтено как вертикальное движение жгута, так и сетного полотна. Составлены дифференциальные уравнения для процессов погружения, получены выражения для времени и скорости погружения нижней подборы на заданную глубину. Проведенные расчеты и их сравнение с данными экспериментов свидетельствуют о достаточной для инженерных расчетов точности и возможности использовать приведенные алгоритмы при проектировании кошельковых неводов.

Ключевые слова: нижняя подбора, кошельковый невод, сетное полотно, время погружения, скорость погружения.

Mathematical model of immersion of the purse seine bottom rope to the working depth

Nikolay L. Velikanov^{1,2}, Oleg V. Sharkov^{1,2}¹Kaliningrad State Technical University, Russian Federation
²Immanuel Kant Baltic Federal University, Russian Federation

Abstract. Purse seine fishing is the second most common type of fishing after trawl fishing. However, the theory of purse fishing, in particular the mechanics of the purse seine, is constantly being improved. This is facilitated by field tests. In this paper, we use the results of measurements of the dive parameters of the bottom rope of the purse seine of project 1793, obtained during measurements at the fishing of «MarineSPA». A model of immersion is proposed, which takes into account both the vertical movement of the harness and the netting. Differential equations for immersion processes are compiled, and expressions are obtained for the time and speed of immersion of the bottom rope to a given depth. The calculations performed and their comparison with experimental data indicate sufficient accuracy for engineering calculations and the ability to use these algorithms in the design of purse seines.

Key words: bottom rope, purse seine, netting, immersion time, immersion speed.

Введение

Лов рыбы кошельковыми невода является одним из наиболее распространенных способов и занимает второе место в мире после тралового, что составляет примерно 10...15 % от общего улова. Применение кошельковых неводов позволяет проводить лов рыбы как в открытом океане, так и прибрежной зоне [1–6].

В некоторых странах процент рыбы, добываемой с помощью кошелькового лова, существенно выше. В Японии с использованием лова кошельковыми неводами добывают более 2,5 млн. т различных видов рыб (скумбрии, ставриды, иваси и др.), что составляет примерно 1/3 от всей добычи рыбы. В стране функционирует Всеяпонская ассоциация кошелькового промысла.

Одним из направлений повышения эффективности кошелькового промысла является разработка математических моделей, позволяющих описать поведение кошелькового невода на всех этапах его работы – замета, погружения и выборки сетного полотна, кошелькования и др.

С математической точки зрения кошельковый невод представляет собой сложную техническую систему с двумя степенями свободы, движение которой описывается системой дифференциальных

уравнений второго порядка, не имеющими в общем случае аналитического решения.

В данной статье рассматривается методика расчета скорости и времени погружения нижней подборы кошелькового невода на заданную глубину.

1. Современное состояние вопроса

Первым задачу о погружении нижней подборы кошелькового невода поставил и решил Ф.И. Баранов [7]. Он принимал следующие допущения – дель представляет собой плоский элемент (длина=1 м), который строго вертикально погружается в воду под действием сил тяжести сетного полотна и грузил.

Математические модели времени погружения невода получены из условия равенства двух сил – силы сопротивления сетного полотна и тяжести грузил в виде

$$t = \frac{2y^{3/2}}{3} \sqrt{\frac{0,5\rho C_{x0}}{q}} \quad \text{и} \quad t = \frac{2y^{3/2}}{3} \sqrt{\frac{0,5\rho C_{x0}}{q + 0,6\rho y}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; q – сила тяжести в воде погонного метра подборы; p – сила тяжести в воде одного квадратного метра дели; y – рабочая глубина погружения; C_{x0} – коэффициент сопротивления плоской сети при продольном обтекании.

В работах Н.Н. Андреева [8] учитывается, что погружаясь нижняя подборка невода отклоняется от вертикальной оси на некоторый угол (угол атаки). Это происходит по тому, что действие внутренних сил сетного полотна стремится развернуть последнее по поверхности, сужающейся к низу. Кроме того, при замете фактическая форма жгута кошелькового невода отличается от номинально, принимаемой в расчетах круглой формы. Таким образом, жгут попадает на поверхность воды в несколько расправленном виде.

Формула, предложенная Н.Н. Андреевым, имеет вид

$$t = \frac{1}{\rho} \left(\sqrt{18(\rho y + q) \left[1 + \frac{\beta}{90} \left(10^2 \frac{d}{a} - 1 \right) \right]} y - q \sqrt{\frac{18 \left[1 + \frac{\beta}{90} \left(10^2 \frac{d}{a} - 1 \right) \right]}{\rho} \ln \frac{\sqrt{\rho y + q} + \sqrt{\rho y}}{\sqrt{q}}} \right), \quad (2)$$

где β – угол атаки сетного полотна; d – диаметр нити сетного полотна; a – шаг ячеи сетного полотна.

В дальнейших работах рассматривалось математическое описание процесса погружения сетного полотна с учетом влияния дополнительных факторов. Несмотря на многочисленные исследования в этой области [9–16] вопрос математического моделирования процесса погружения сетного полотна кошелькового невода не имеет исчерпывающего решения.

2. Расчетная схема и математическая модель

Рассмотрим расчетную схему процесса погружения нижней подборки кошелькового невода (рис. 1), которая опираясь на уже известные, более точно описывает физические явления, происходящие в этот период.

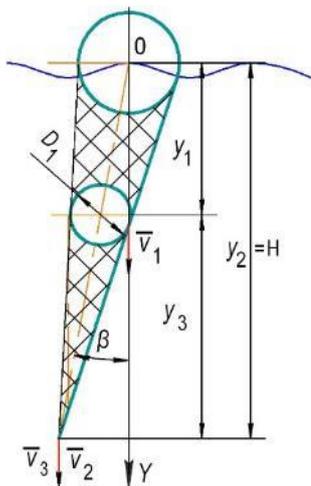


Рис. 1. Расчетная схема процесса погружения нижней подборки на заданную глубину.

Физическая модель представляет собой элемент дели в виде жгута (длина 1 м) круглой формы, который первоначально располагается на свободной поверхности воды.

Под действием сил тяжести оснастки, загрузки и стяжного троса сетное полотно постепенно опускается на рабочую глубину с неизменным углом атаки β и увлекает за собой оставшуюся часть сетного полотна.

Оставшаяся часть сетного полотна, под действием собственного веса, постепенно погружается жгутом, диаметр которого уменьшается. При этом сетное полотно, начиная от верхней подборки невода, постепенно расправляется и прекращает свое движение. Конечная скорость погружения нижней подборки равна нулю, начальная – отлична от нуля.

Объем жгута можно определить по формуле

$$V = \frac{4}{3} \pi \frac{D_1^2}{4} = \Delta L (H - y_2) \cdot d \frac{1}{\cos \beta}, \quad (3)$$

где H – рабочая глубина погружения невода; D_1 – текущий диаметр жгута; y_2 – координата, определяющая положение центра масс нижней подборки.

Из формулы (3) диаметр и массу жгута соответственно можно выразить как:

$$D_1 = 3 \sqrt{\frac{6}{\pi} (H - y_2) \cdot d \frac{\Delta L}{\cos \beta}}; \quad (4)$$

$$M_1 = \frac{\pi d}{a} V \rho_c = \frac{\pi d}{a} \rho_c (H - y_2) d \frac{\Delta L}{\cos \beta}, \quad (5)$$

где ρ_c – плотность материала сетного полотна.

Дифференциальное уравнение для жгута имеет вид

$$M_1 \ddot{y}_1 = M_1 g - C_{x1} \frac{\rho \dot{y}_1^2}{2} \frac{\pi (k D_1)^2}{4}, \quad (6)$$

где y_1 – координата центра масс жгута; C_{x1} – коэффициент сопротивления жгута; k – коэффициент отношения реального диаметра жгута к расчетному.

Учитывая, что силы инерции пренебрежимо малы, и отношение y_2/H меньше единицы, из выражений (3)-(6) получаем.

$$\dot{y}_1 = \frac{2}{k} \sqrt{\frac{\pi d \rho_c g}{3 a C_{x1}}} \sqrt{\frac{6 H k \Delta L}{\pi \cos \beta}} \left(1 - \frac{1}{6} \frac{y_2}{H} \right) + C_1. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее относительное движение участка невода (сетное полотно и нижняя подборка с оснасткой) ниже жгута, имеет вид

$$M \ddot{y}_3 = q \Delta L - C_x \frac{\rho \dot{y}_3^2}{2} \frac{\pi D^2}{4} \Delta L + p \frac{\Delta L}{\cos \beta} y_3 - C_{xc} \frac{\sin^3 \beta}{\cos \beta} \frac{\rho \dot{y}_3^2}{2} y_3 \Delta L, \quad (8)$$

где y_3 – относительная координата центра масс нижней кромки.

Связь между координатами (рис. 1) выражается как $y_2 = y_1 + y_3$.

Пренебрегая силами инерции из выражения (8) получаем

$$\dot{y}_3 = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{2q}{\pi C_{x\rho}}} \sqrt{\frac{1 + \frac{\rho}{q} \frac{1}{\cos\beta} y_3}{1 + \frac{4C_{xc}\Delta L \sin^3\beta}{C_x \pi D^2 \cos\beta} y_3}}. \quad (9)$$

Сомножитель при y_3 в правой части (9) много меньше единицы. Сохраняя в биномиальных рядах первые два слагаемых, получим

$$\dot{y}_3 = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{2q}{\pi C_{x\rho}}} \frac{1 + \frac{\rho}{2q} \frac{1}{\cos\beta} y_3}{1 + \frac{2C_{xc}\Delta L \sin^3\beta}{C_x \pi D^2 \cos\beta} y_3} + C_2. \quad (10)$$

Обозначим отношение координат и скоростей как $\lambda = y_1/y_2 = \dot{y}_1/\dot{y}_2$ и запишем

$$\dot{y}_2 = \frac{2}{D(1-\lambda)} \sqrt{\frac{2q}{C_x \pi \rho}} \times \frac{1 + \frac{\rho}{2q} \frac{1}{\cos\beta} (1-\lambda)y_2}{1 + \frac{2C_{xc}\Delta L \sin^3\beta}{C_x \pi D^2 \cos\beta} (1-\lambda)y_2} + \frac{C_2}{1-\lambda}. \quad (11)$$

Введем следующие соотношения:

$$k_1 = \frac{2}{k} \sqrt{\frac{\pi d \rho c g}{3a C_{x1}}} \sqrt{\frac{6Hd\Delta L}{\pi \cos\beta}}, \quad k_2 = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{2q}{\pi C_x \rho}},$$

$$k_3 = \frac{\rho}{2q} \frac{1}{\cos\beta}, \quad k_4 = \frac{2C_{xc}\Delta L \sin^3\beta}{C_x \pi D^2 \cos\beta}. \quad (12)$$

Тогда скорость погружения нижней подборы можно записать как

$$v_y = \dot{y}_2 = \frac{k_1}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{6} \frac{y_2}{H}\right) + \frac{C_1}{\lambda} = \frac{k_2}{1-\lambda} \frac{1 + k_3 y_2 (1-\lambda)}{1 + k_4 y_2 (1-\lambda)} + \frac{C_2}{1-\lambda}. \quad (13)$$

Из условий – при $y_2 = H, \dot{y}_2 = 0$ и $\lambda = 0,5$ получим

$$C_1 = -\frac{5}{6} k_1 \text{ и } C_2 = -k_2 \frac{1 + 0,5k_3 H}{1 + 0,5k_4 H}. \quad (14)$$

Из (13) с учетом (14) получим

$$y_2 \lambda^2 + \left(\frac{H}{2} - y_2 \left[1 - \frac{k_4 k_1 (1 + 0,5k_4 H)(H - y_2)}{6k_2 H(k_4 - k_3)} \right] \right) \lambda - \frac{k_1 (1 + 0,5k_4 H)}{6k_2 H(k_4 - k_3)} (H - y_2)(k_4 y_2 + 1) = 0 \quad (15)$$

Для случая $y_2 = 0$, с учетом (15), имеем

$$\lambda_0 = \frac{k_1 (1 + 0,5k_4 H)}{3Hk_2 (k_4 - k_3)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) является квадратичным относительно коэффициента λ . Решая его, найдем

$$\lambda = -\frac{H}{4y_2} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_4 k_1}{k_2} \frac{1 + 0,5k_4 H(H - y_2)}{6H(k_4 - k_3)} \right) + \left[\left(-\frac{H}{4y_2} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_4 k_1}{k_2} \frac{1 + 0,5k_4 H(H - y_2)}{6H(k_4 - k_3)} \right) \right)^2 + \frac{k_1}{y_2 k_2} \frac{1 + 0,5k_4 H}{6H(k_4 - k_3)} (H - y_2)(1 + k_4 y_2) \right]^{0,5}. \quad (17)$$

Из (10) и (12) получаем

$$\dot{y}_3 = k_2 \frac{1 + k_3 y_3}{1 + k_4 y_3} + C_2 \quad (18)$$

Разделяя в (10) переменные и приравняв интегралы от левой и правой частей, получим выражения для определения времени погружения нижней подборы

$$t = \frac{(1 + 0,5k_4 H)}{k_2 (k_4 - k_3)} \left[(1 + 0,5k_4 H) \ln \left| \frac{H}{H - 2y_2(1-\lambda)} \right| - k_4 y_2 (1-\lambda) \right] + C_3 \quad (19)$$

Постоянную интегрирования C_3 находим из начальных условий в начальный момент времени – $t = 0$ и $y_2 = 0$. Тогда для выражения (19) можно принять $C_3 = 0$.

Окончательно с учетом (13) и (14) определяем скорость погружения

$$v_y = \dot{y}_2 = \frac{k_1}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{6} \left(\frac{y_2}{H} + 5 \right) \right]. \quad (20)$$

Учитывая условие $y_2 = 0$ из выражений (15) и (20) начальную скорость погружения можно найти как

$$v_0 = k_2 \frac{H(k_4 - k_3)}{2 + k_4 H}. \quad (21)$$

2. Результаты расчетов и дискуссия

Зависимости (3)-(21) представляют собой математическую методику расчета кинематических характеристик процесса погружения нижней подборы кошелькового невода на заданную глубину.

Характер зависимости времени погружения нижней подборы от глубины, полученный в результате натуральных исследований и теоретического расчета, представлен на рис. 2.

Результаты натуральных исследований получены для кошелькового невода проекта 1793 специалистами АО «Мари НПО» [17]. Кошельковый невод имел следующие основные характеристики: длина верхней подборы $L = 740$ м; высота в центральной части $H_c = 150$ м; коэффициенты посадки по верхней и нижней подборе $U_1 = U_2 = 0,707$; шаг ячеи $a = 16 \cdot 10^{-3}$ м; общий вес нижней подборы $Q = 31,2$ кН [17].

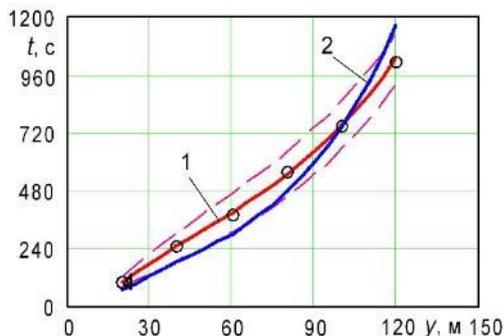


Рис. 2. Изменение времени погружения нижней подборы от глубины: 1 – натурные исследования; 2 – расчет по формуле (19).

В процессе натурных исследований проводилось измерение времени, за которое нижняя подбора невода погружалась на заданную глубину. Рабочая глубина погружения задавалась из ряда чисел – 20, 40, 60, 80, 100 и 120 м. Для каждой заданной глубины проводилось пять замеров.

На рис. 3 представлена теоретическая зависимость скорости погружения нижней подборы невода от глубины. Расчеты выполнены по формуле (20).

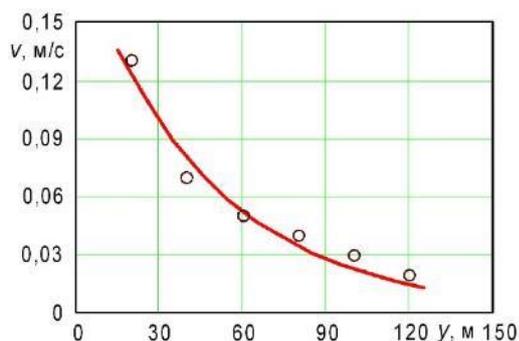


Рис. 3. Изменение скорости погружения нижней подборы от глубины.

Как видно из полученных результатов (рис. 2) данные натурных испытаний и теоретических расчетов по формуле (19) имеют хорошее качественное и количественное совпадение. Практически для всего диапазона изменения глубин погружения теоретические величины не выходят за пределы доверительного интервала (величина доверительной вероятности 0,9) экспериментальных величин.

Результаты теоретических расчетов (рис. 2 и 3) качественно совпадают с данными натурных опытов [18], в результате которых установлено, что время и скорость погружения нижней подборы кошелькового невода зависит от глубины погружения и описывается степенными функциями.

Заключение

Разработанные математические модели и полученные расчетные зависимости (19), (20) позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью определять время и скорость погружения нижней подборы кошелькового невода на заданную глубину. Сравнение с экспериментальными данными показывает хорошую сходимость результатов.

Полученные формулы будут способствовать уточнению расчетных схем, используемых на стадии проектирования орудий промышленного рыболовства.

Литература

1. Tsutomu T. Development of support systems for fishing technology: introduction of ICT in purse seine fishing // Nippon suisan gakkaiishi. 2017. V.83(1). Pp. 92-92.
2. Encarnacion C.L., Felix G.O., Juan J.G.H. The determinants that cause small-scale vessels to exit fishing: The case of the Spanish small-scale purse seine fishery // Fisheries research. 2016. V.181. Pp. 155-162.
3. Jose C.B., Maria L.R., Miguel H. Monitoring of Spanish flagged purse seine fishery targeting tropical tuna in the Indian ocean: Timeline and history // Marine policy. 2020. V.119. 104094.
4. Gabriel O., Lange K., Dahm E., Wendt T. Fish catching methods of the world. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 2005. 536 p.
5. Бойцов А.Н., Баринов В.В., Лисиенко С.В., Осипов Е.В. Объектная модель промысловой системы кошелькового лова // Рыбное хозяйство. 2017. №6. С. 88-89.
6. Брик Л.И., Баринов В.В. Обоснование технологии промысла тихоокеанского кальмара кошельковым неводом // Научные труды Дальрыбвтуза. 2013. Т.30. С. 64-70.
7. Баранов Ф.И. Техника промышленного рыболовства. Москва: Пищепромиздат, 1969. 656 с.
8. Андреев Н.Н. Проектирование кошельковых неводов. Москва: Пищевая промышленность, 1970. 278 с.
9. Кулагин В.Д., Печерский Б.Г. Разноглубинные кошельковые неводы. Москва: Агропромиздат, 1985. 88 с.
10. Riziotis V., Katsaounis G.M. Tzabiras G. Numerical and experimental analysis of the hydroelastic behavior of purse seine nets // Ocean engineering. 2013. V.58. Pp. 88-105.
11. Zhou C., Xu L-X., Tang H., Hu F-X., He P-G., Kumazawa T., Wang X-F., Wan R., Dong S-C. Identifying the design alternatives and flow Interference of tuna purse seine by the numerical modelling approach // Journal of marine science and engineering. 2019. V.7(11). 405.
12. Kim H-Y., Lee C-W., Shin J-K., Kim H-S., Cha B-J., Lee G-H. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification // Fisheries Research. 2007. V.88(1-3). Pp. 109-119.

13. Кручинин О.Н. Схемы и математические модели замета кошелькового невода // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2005. Т.142. С. 330-348.
14. Недоступ А.А., Полозков А.В. Математическое моделирование процесса погружения стенки кошелькового невода без учета течения // Рыбное хозяйство. 2011. №3. С. 100-102.
15. Бойцов А.Н., Лисиенко С.В., Осипов Е.В. Модель расчета оптимальной траектории замета кошелькового невода // Рыбное хозяйство. 2017. №6. С. 90-91.
16. Великанов Н.Л. Определение скорости погружения нижней подборы при проектировании кошелькового невода // Известия КГТУ. 2004. №6. С. 139-144.
17. Исследование гидродинамических сил, действующий на кошельковый невод // Отчет о научно-исследовательской работе №2459. Калининград: НПО промышленного рыболовства, 1985. 45 с.
18. Хромов В.В. Влияние скорости погружения нижней подборы на рабочую глубину. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1967. 33 с.

References

1. Tsutomu T. (2017) Development of support systems for fishing technology: introduction of ICT in purse seine fishing. *Nippon suisan gakkaiishi*. V.83(1). Pp. 92-92.
2. Encarnacion C.L., Felix G.O., Juan J.G.H. (2016) The determinants that cause small-scale vessels to exit fishing: The case of the Spanish small-scale purse seine fishery. *Fisheries research*. V.181. Pp. 155-162.
3. Jose C.B., Maria L.R., Miguel H. (2020) Monitoring of Spanish flagged purse seine fishery targeting tropical tuna in the Indian ocean: Timeline and history. *Marine policy*. V.119. 104094.
4. Gabriel O., Lange K., Dahm E., Wendt T. *Fish catching methods of the world*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 2005. 536 p.
5. Boitsov A.N., Barinov V.V., Lisienko S.V., Osipov E.V. (2017) Ob'ektnaya model' promyslovy sistemy koshel'kovogo lova [The object model of the system of commercial purse seine fishing] *Rybnoe khozyaystvo*. No6. Pp. 88-89.
6. Brik L.I., Barinov V.V. (2013) Obosnovanie tekhnologii promysla tikhookeanskogo kal'mara koshel'kovym nevodom [Justification of the technology of fishing for pacific squid with purse seines] *Научные труды Дальрыбвтуза*. V.30. Pp. 64-70.
7. Baranov F.I. *Tekhnika promyshlennogo rybolovstva [Industrial fishing equipment]* Moskva: Pishchepromizdat, 1969. 656 p.
8. Andreev N.N. *Proektirovanie koshel'kovykh nevodov [The design of purse seines]* Moskva: Pishchevaya promyshlennost', 1970. 278 p.
9. Kulagin V.D., Pechersky B.G. *Raznoglubinnye koshel'kovye nevodyy [Multi-depth purse seines]* Moskva: Agropromizdat, 1985. 88 p.
10. Riziotis V., Katsaounis G.M. Tzabiras G. (2013) Numerical and experimental analysis of the hydroelastic behavior of purse seine nets. *Ocean engineering*. V.58. Pp. 88-105.
11. Zhou C., Xu L-X., Tang H., Hu F-X., He P-G., Kumazawa T., Wang X-F., Wan R., Dong S-C. (2019) Identifying the design alternatives and flow interference of tuna purse seine by then modelling approach. *Journal of marine science and engineering*. V.7(11). 405.
12. Kim H-Y., Lee C-W., Shin J-K., Kim H-S., Cha B-J., Lee G-H. (2007) Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification. *Fisheries research*. V.88(1-3). Pp. 109-119.
13. Kruchinin O.N. (2005) Skhemy i matematicheskie modeli zameta koshel'kovogo neвода [Schemes and mathematical models of purse seine detection] *Izvestiya TINRO (Tikhookeanskogo nauchno-issledovatel'skogo rybokhozyaystvennogo tsentra)*. V.142. Pp. 330-348.
14. Alexander A.A., Polozkov A.V. (2011) Matematicheskoe modelirovanie protsessa pogruzheniya stenki koshel'kovogo neвода bez ucheta techeniya [Mathematical modeling of the process of immersion the wall of the purse seine without taking into account the flow] *Rybnoe khozyaystvo*. No3. Pp. 100-102.
15. Boitsov A.N., Lisienko S.V., Osipov E.V. (2017) Model' rascheta optimal'noy traektorii zameta koshel'kovogo neвода [Model for calculating the optimal trajectory of a purse seine sweep] *Rybnoe khozyaystvo*. No6. Pp. 90-91.
16. Velikanov N.L. Opredelenie skorosti pogruzheniya nizhney podbory pri proektirovanii koshel'kovogo neвода [Determination of the immersion speed of the bottom rope when designing a purse seine] *Izvestiya KGTU*. 2004. No6. Pp. 139-144.
17. Issledovanie gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchiy na koshel'kovyy nevod. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote No2459 [Investigation of hydrodynamic forces acting on the purse seine. Research report No2459] *Kaliningrad: NPO promyshlennogo rybolovstva*, 1985. 45 p.
18. Khromov V.V. Vliyanie skorosti pogruzheniya nizhney podbory na rabochuyu glubinu [Influence of the immersion speed of the bottom rope on the working depth] *Vladivostok: Dal'nevostochnoe knizhnoe izdatel'stvo*, 1967. 33 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Великанов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: monolit8@yandex.ru.

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, Олег Васильевич Шарков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории механизмов и машин и деталей машин, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: o_sharkov@mail.ru.

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.

Nikolay L. Velikanov, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of water resources and water use, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av., 1, e-mail: monolit8@yandex.ru.

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 theory of mechanisms and machines and machine parts, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av., 1, e-mail: o_sharkov@mail.ru.

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.

Численное моделирование волнового и ветрового воздействия на систему якорения садкового модуля для выращивания рыбы в морских акваториях

Е.А. Тихонов¹, И.В. Григорьев², В.И. Базыкин³, А.А. Шубин¹

¹Петрозаводский государственный университет, ²Арктический государственный агротехнологический университет, ³Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ.

Аннотация. В представленной работе рассматриваются технические аспекты совершенствования конструкции садкового модуля для промышленного выращивания рыбы. Цель работы: уменьшение затрат на систему удержания положения садкового модуля на водоеме. Задача, которую необходимо решить для достижения данной цели заключается в разработке новой системы удержания садков с учетом их взаимодействия в едином модуле. Для решения данной задачи использован патентный поиск и анализ сильных и слабых сторон известных технических решений садков и их систем. Проанализированы недостатки так называемой «норвежской системы» удержания садковых модулей. Разработана система удержания садкового модуля, в которой не подразумевается использование круглозвенных цепей, а натяжение системы обеспечивается балансиром. Кроме того, в методику расчета введен учет вертикальной составляющей при расчете реакции опоры якоря, что позволило более точно рассчитать необходимую массу якорей с учетом уменьшения силы трения и архимедовой силы.

Ключевые слова: Аквакультура; система удержания садкового модуля, волновые нагрузки, численное моделирование динамических систем.

Numerical simulation of wave and wind effects on the anchoring system of a cage module for growing fish in marine areas

Evgenii A. Tihonov¹, Igor V. Grigorev², Valentin I. Bazyikin³, Andrey A. Shubin¹

¹Petrozavodsk state university, ²Federal Scientific Agroengineering Centre VIM, ³Arctic state agrotechnological University

Abstract. This paper discusses the technical aspects of improving the design of the cage module for industrial fish farming. Objective: to reduce the cost of the system for holding the position of the cage module on the reservoir. The task that needs to be solved to achieve this goal is to develop a new system for holding cages, taking into account their interaction in a single module. To solve this problem, we used patent search and analysis of the strengths and weaknesses of known technical solutions of cages and their systems. The disadvantages of the so-called "Norwegian system" for holding cage modules are analyzed. A system for holding the cage module has been developed, which does not imply the use of round-link chains, and the tension of the system is provided by balancers. In addition, the calculation method takes into account the vertical component when calculating the reaction of the anchor support, which made it possible to more accurately calculate the required mass of anchors, taking into account the reduction of the friction force and Archimedean force.

Key words: Aquaculture; cages holding system, wave loads, dynamic models FEA-modelling.

Введение

В настоящее время промышленное выращивание рыбы в садках развивается в Республике Карелия [1], в Псковской области [2], а также в других регионах [3, 4] и странах [5, 6]. С увеличением объемов производства рыбы возрастает актуальность технических и биологических проблем получения экологически безопасной продукции рыбного хозяйства [1, 8].

В представленной работе рассматриваются технические аспекты совершенствования конструкции системы удержания садков для промышленного выращивания рыбы. В данной области, как правило применяется так называемая «Норвежская система удержания» (см. рисунок 1). Основной особенностью данной системы является применение круглозвенных якорных цепей, соединяющих удерживающий канат и якорь. При работе такой системы удержания часть цепи лежит на дне, а часть висит в толще воды, тем самым, с одной стороны, обеспечивая натяжения всей системы канатов и исключая вертикальную составляющую силы действующей на якорь. При этом, для корректной работы системы необходимо, чтобы часть цепи всегда лежала на дне. Поэтому,

минимальная длина цепи является расчетным параметром при проектировании подобных систем и сильно зависит от волновой и ветровой нагрузок.

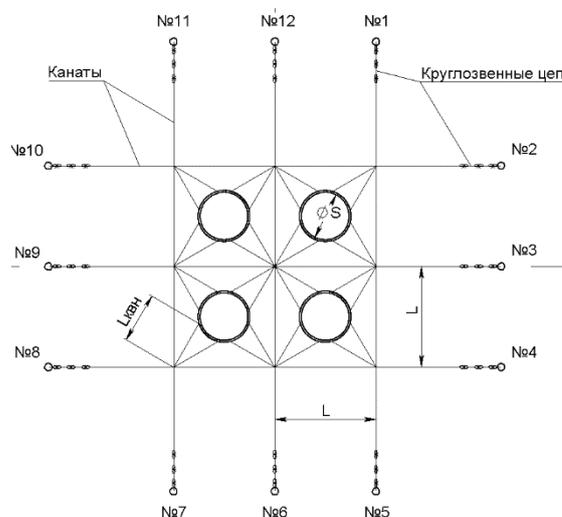


Рис. 1. Система якорения садкового модуля: №1..№12 - якоря

При такой системе, каждый садок находится в своей ячейке, в которой удерживается внутренними канатами (см. рисунок 2). Такие канаты, как правило, имеют меньший диаметр, нежели основные и сильно усложняют такелажное обеспечение системы якорения.

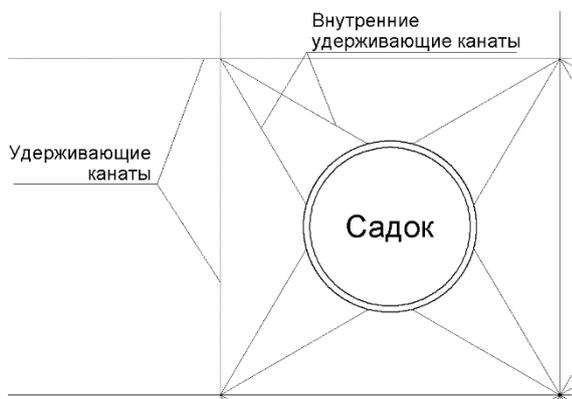


Рис. 2. Внутренние канаты, удерживающие садок.

Необходимость в большом количестве точек крепления садка обусловлена его малой сопротивляемостью растяжению, что может привести к потере устойчивости элементов устойчивости (как правило – трубы из полиэтилена низкого давления).

Отсюда, все недостатки подобных систем якорения: неоправданно большое количество канатов и грузов, необходимость применения тяжелых круглозвенных цепей значительной длины. При этом, стоимость 1 метра круглозвенной цепи очень высока.

1. Материалы и методы

Цель работы: уменьшение затрат на систему удержания садкового модуля за счет снижения требуемого количества канатов и отказ от использования круглозвенных цепей.

Задача, которую необходимо решить для достижения данной цели заключается в разработке динамической расчетной модели системы удержания садкового модуля, которая будет учитывать ветровую и волновую нагрузки на модуль, а также обеспечит натяжение системы и учет вертикальной составляющей реакции опоры якоря.

Для решения данной задачи применялся численный метод моделирования динамических систем. Данный метод показал свою эффективность и хорошую адекватность получаемых результатов [7].

Для решения данной задачи была смоделирована система удержания садкового модуля из 4-х садков диаметром 25м. Общая компоновка системы представлена на рисунке 3.

Далее, необходимо выполнить следующие этапы расчета:

1. Определить исходные данные для расчета.
2. Расчет ветровой нагрузки на один садок.
3. Расчет комплексного динамического воздействия волна/ветер на садковый модуль.
4. Определение максимального осевого усилия в удерживающих канатах;
5. Определение необходимой массы якоря с учетом динамической отрывающей силы.

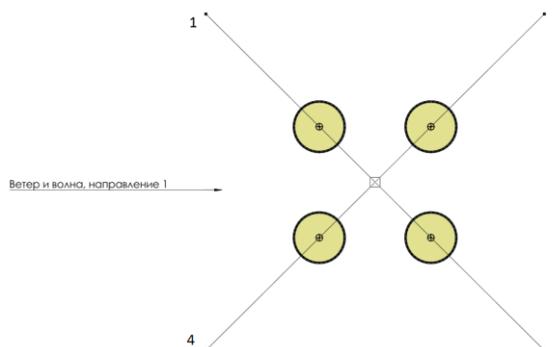


Рис. 3. Система фиксации садков. 1, 2, 3, 4 – якоря.

В качестве исходных данных примем следующее:

1. Скорость ветра: 20 м/с.
2. Параметры волны:
 - а. Высота: 1,88 м
 - б. Длина: 20,7 м
 - в. Период: 3,64 с
3. Течение: 0,15 м/с (пренебрегаем)
4. Усилие на балансирах: 1000 Н (см. рис. 3.3)

Расчет ветровой нагрузки осуществляется в два этапа:

1. Определение эпюры скоростей потока воздуха, проходящего через садок.
2. Определение суммарного гидравлического давления на элементы конструкции садка;
3. Определение реакции опоры места крепления садка.

Для решения поставленных задач используем систему численного моделирования Flow Simulation и Simulation. Для расчета используем упрощенную модель садка с хомутами, обеспечивающими требуемую парусность (см. рисунок 2).

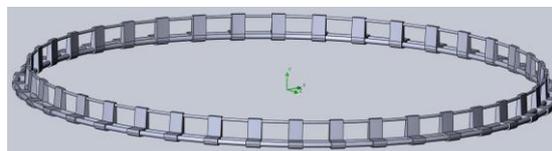


Рис. 4. Модель садка для определения ветровой нагрузки.

Помимо парусности, эквивалентной реальному садку, с учетом наводной части сетного мешка (дели), модель имеет жесткость и упругость, аналогичные жесткости и упругости садка из полиэтиленовых труб диаметром 250мм и толщиной стенки соответствующей типу - SDR26 (9,6мм). Данное условие необходимо для адекватного моделирования динамики и инерционных процессов. Также, упругость садков в значительной степени влияет на появление резонанса в колебательном контуре системы и повышению нагрузок, которые практически невозможно вычислить аналитическими методами.

Результат моделирования распределения скоростей потоков воздуха при прохождении их через садок представлен на рисунке 5.

Данная ветровая нагрузка приводит к деформациям садка. Форма садка становится эллиптической в пределах упругих деформаций элементов конструкции садка. Определим усилие, действующее на садок, от ветровой нагрузки путем

определения реакции опоры места крепления каната к садку (см. рисунок 8).

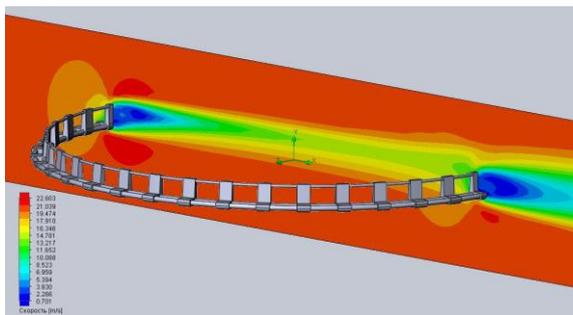


Рис. 5. Распределение скоростей потока воздуха в диаметральной плоскости садка.

По результатам выполненного расчета принимаем ветровую нагрузку, действующую на 1 садок, равную 2830 Н. Приложение данной нагрузки будет осуществляться посредством силы, приложенной к упрощенной модели садка.

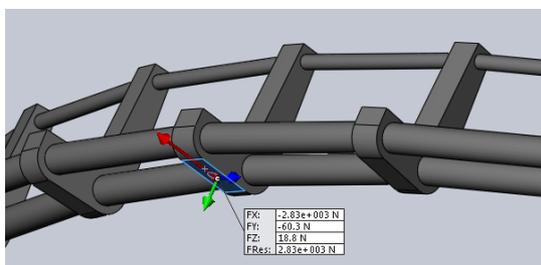


Рис. 6. Реакция опоры места крепления каната к садку.

Для определения динамического воздействия ветра и волны используем систему ANSYS MECHANICAL. Применим нестационарный тип анализа, который подразумевает моделирование системы во времени. Для построения расчетной модели используем упрощенную модель садков. Для моделирования канатов используем балочный элемент link180. Общий вид системы представлен на рисунке 7.

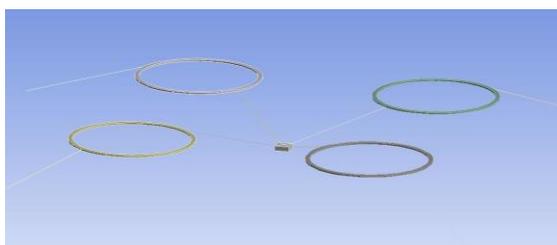


Рис. 7. Общий вид расчетной модели садкового модуля.

В качестве одного из допущений модели примем, что перемещения частей садков по вертикали определяются формой водной поверхности. Волна формируется гармонической функцией, в соответствии с параметрами волны, волновая функция соответствует высоте, длине и периоду волны (либо скорости распространения).

В соответствии с реальными условиями эксплуатации модель ограничена 4 якорными точками. На балансир в центре действует сила,

равная 1000Н. Ветровая нагрузка прикладывается к каждому садку (см. рис. 9).

Направление движения волн совпадает с вектором приложения ветровой нагрузки.

В целом на систему действует ускорение, равное 4000 мм/с^2 . Данное ускорение имитирует силу тяжести для канатов погруженных в воду.

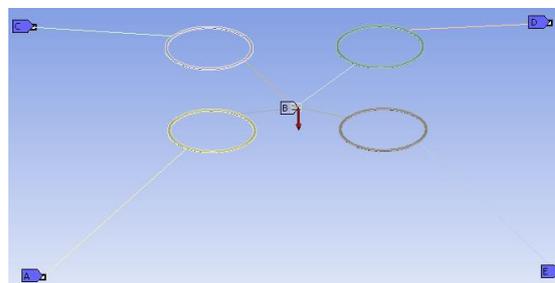


Рис. 8. Сила тяжести балансира.

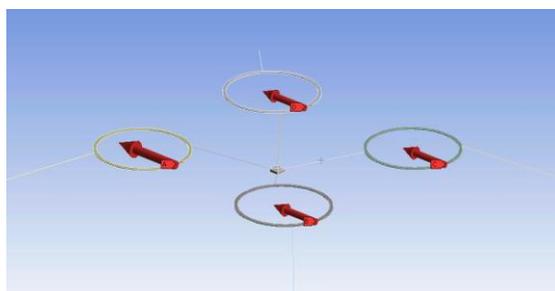


Рис. 9. Приложение ветровой нагрузки.

В целом, система будет иметь период времени, когда, выйдя на устоявшийся режим, резонансные явления будут появляться периодически. Задачей расчета является определение максимальных усилий в канатах и реакции опор якорей в этот момент времени. Из предыдущего опыта подобных расчетов известно, при длительности моделирования системы, равной 50с. данный момент времени уже наступит. Минимальный шаг по времени расчета, который характеризует уровень адекватности модели, составит 0,01с. Увеличение шага по времени делает расчет неустойчивым в результатах проявляются неадекватные данные (либо слишком высокие, либо малые нагрузки). Излишнее дробление шага ведет к увеличению времени моделирования и требует больших расчетных мощностей.

2. Результаты

При использовании расчетного сервера из 2-х процессоров XEON E7560 по 8 ядер каждый, с тактовой частотой 3,22ГГц и 96 Гб оперативной памяти, расчет выполнялся 36 часов.

По результатам расчета получены графики изменения осевого усилия всех канатов. Канаты, находящиеся со стороны распространения волны и направления ветра – наиболее нагруженные. При этом, из-за введенной в модель псевдо несимметричности, которая позволяет более адекватно моделировать реальные объекты, один канат является более нагруженным. График изменения осевого усилия наиболее нагруженного каната представлен на рисунке 10.

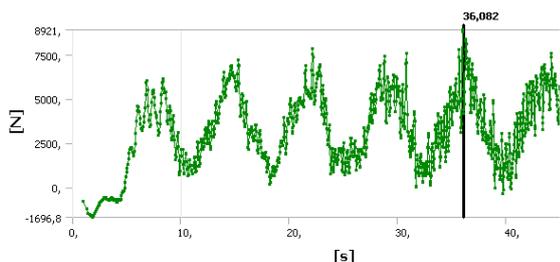


Рис. 10. Изменение осевого усилия наиболее нагруженного каната.

Как видно из графика, периоды колебаний осевой нагрузки хорошо отражает поведение системы в целом. Наиболее сильное резонансное явление наблюдается на 36 секунде моделирования. Максимальное осевое усилие, в данный момент времени, равно 8921 Н. Цикличность волновой и инерциальных нагрузок системы в момент резонанса повышает осевое усилие на канаты почти на 15%. Теперь, согласно рассчитанному максимальному усилию, необходимо подобрать канат.

В системах удержания, как правило, используют два типа канатов: полипропиленовые и полиамидные. Полиамидные канаты обладают значительно более высокой прочностью, имеют плотность выше плотности воды. Это приводит к тому, что при обрыве такого каната он тонет. Это затрудняет обнаружение обрыва. Полипропиленовые канаты обладают меньшей прочностью, но положительной плавучестью. Это облегчает поиск мест обрыва, но в тоже время повышает опасность наезда на плавающий канат гребным винтом.

С учетом деградации, как полиамида, так и полипропилена в воде и под действием ультрафиолетового солнечного излучения, Ресурс канатов определяется длительностью в 4-5 лет. Коэффициент запаса прочности принимается равным 1,5.

Так как в системе не используются круглозвенные цепи, то усилие, действующее на якорь, не будет направлено горизонтально. Тогда, для определения требуемой массы якорей необходимо учесть комплексный фактор Z/XY. Комплексный фактор Z/XY учитывает величину вертикальной составляющей реакции опоры якоря. В таблице 1 представлены значения усилий, действующих на якоря (опоры) с самым нагруженным канатом, по осям координат.

Далее, определим необходимую силу тяжести для каждого якоря. В дальнейшем, в зависимости от типа местности, может быть принято решение об определении массы всех якорей, равной самой большой расчетной массе. Но, если садковый модуль стоит, например в проливе, где направление волновой и ветровой нагрузок примерно постоянно, то можно значительно снизить стоимость системы якорения применив менее тяжелые якоря.

Требуемую силу тяжести груза определим через минимально необходимую силу трения. Коэффициент трения якоря о дно (удерживающая сила) примем как для гравитационного якоря, без зацепов и лап $f = 1,01$.

Таблица 1

Максимальные значения реакций опор по декартовым координатам.

№ опоры	По оси X, Н	По оси Y, Н	По оси Z, Н	Суммарная реакция опоры в горизонтальной плоскости, Н
1.	5142	4737	1673	6991
2.	2997	2714	1081	4043
3.	1817	1836	775	2583
4.	5657	5924	2238	8191

Тогда, минимальная составляющая сила тяжести якоря в воде с учетом отрывающего усилия будет определяться по формуле:

$$N = \frac{(\bar{X} + \bar{Y})}{f} + N_z \quad (1)$$

где, N_z – сила реакции опоры якоря по оси Z.

Сведем в таблицу 2. результаты расчета минимальной требуемой силы тяжести якорей в воде.

Таблица 2

Значения минимальной требуемой силы тяжести якорей в воде

№ груза	Минимальная требуемая сила тяжести грузов
1.	8663
2.	5124
3.	3357
4.	10429

Данная сила тяжести действует в воде. Так как оценка массы якоря будет производиться на суше, то для расчета необходимой массы якорей необходимо скомпенсировать архимедову силу. Для этого примем плотность материала якоря (гранит) равную 2500 кг/м³. В принципе, чем более высокая плотность у материала якоря, тем меньше оказывается влияние силы Архимеда.

Дальнейший расчет требуемой массы якоря на суше определяется итерационным методом. При этом, варьируемым параметром для расчета является объем якоря. От него считается архимедова сила и минимальная сила тяжести якоря на суше, и его масса. Далее, исходя из плотности, определяется расчетный объем. Объем якоря и расчетный объем должны в итоге совпадать. Результаты расчета сведем в таблицу 3.

Таблица 3

Итерационный расчет массы якорей

Объем груза, куб.м	Сила Архимеда, Н	Мин. сила тяжести якоря на суше, Н	Масса якоря, кг	Расчетный объем якоря, куб.м
0,59	5786	14449	1473	0,59
0,35	3432	8556	872	0,35
0,22	2158	5515	562	0,22
0,71	6963	17392	1773	0,71

Заключение

Моделирование предложенной системы удержания садкового модуля показало перспективность применения балансиров и отказ от использования круглозвенных цепей. Это стало

возможным благодаря выделению из расчетных реакций опор якорей вертикальной составляющей. Предложенная система позволяет уменьшить требуемое количество канатов и сопутствующего такелажного обеспечения.

Литература

1. Кузнецова Е.В. Особенности болезней лососевых рыб при садковом выращивании // Международный вестник ветеринарии. 2016. № 4. С. 18-21.
2. Монахов И.А., Купинский С.Б. Выращивание товарной форели в садках на примере рыбноводного хозяйства Псковской области // В сборнике: Континентальная аквакультура: ответ вызовам времени 2016. С. 233-235.
3. Судакова Н.В., Кушникова Л.Б., Ануарбеков С.М., Евсеева А.А., Жаркенов Д.К. Особенности садкового выращивания пеляди (*coregonus peled*) и радужной форели (*oncorhynchus mykiss*) в горных водоёмах восточного Казахстана // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 4 (18). С. 21-27.
4. Хандожко Г.А., Васильев А.А. Результаты производственной апробации выращивания стерляди // Вестник Саратовского государственного университета им. Н.И. Вавилова. 2013. № 2. С. 45-46.
5. Жаркенов Д.К., Неваленный А.Н., Искеков К.Б., Асылбекова С.Ж., Садыкулов Т.С., Ануарбеков С.М., Бадрызлова Н.С. Технология выращивания форели на Таинтинском водохранилище в Восточно-Казахстанской области // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2017. № 4. С. 85-94.
6. Горина М. А., Горин А. В., Козырев Д. Л. Моделирование динамических систем // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 31. – С. 726–730. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/970160.htm>.
7. Aqualine Midgard System [Электронный ресурс] <http://www.aqualine.no/en/products/> [дата обращения 10.08.2020].
8. Тихонов Е.А., Анчеев В.А., Маганов И.А., Курицын А.Е. Садок для промышленного выращивания рыбы с системой подъема сетной камеры. Патент RU 160 857. Опубликовано: 10.04.2016.
9. Fish Farm Nets [Электронный ресурс] <http://crnetloft.ca/fish-farm-nets> [дата обращения 21.08.2020].

References

1. Kuznetsova E.V. Osobennosti boleznei lososevykh ryb pri sadkovom vyrashchivani [Features of diseases of salmon fish during cage cultivation]. Mezhdunarodnyi vestnik veterinarii. 2016. № 4. S. 18-21.
2. Monakhov I.A., Kupinskii S.B. Vyrashchivanie tovarnoi foreli v sadkakh na primere rybovodnogo khozyaistva Pskovskoi oblasti [Growing commercial trout in cages on the example of a fish farm in the Pskov region]. V sbornike: Kontinental'naya akvakul'tura: otvet vyzovam vremeni 2016. S. 233-235.
3. Sudakova N.V., Kushnikova L.B., Anuarbekov S.M., Evseeva A.A., Zharkenov D.K. Osobennosti sadkovogo vyrashchivaniya pelyadi (*coregonus peled*) i raduzhnoi foreli (*oncorhynchus mykiss*) v gornykh vodoemakh vostochnogo Kazakhstana [Features of garden cultivation of Peled (*coregonus peled*) and rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) in mountain reservoirs of East Kazakhstan]. Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya. 2017. № 4 (18). S. 21-27.
4. Khandozhko G.A., Vasil'ev A.A. Rezul'taty proizvodstvennoi aprobatsii vyrashchivaniya sterlyadi [The results of production testing of the cultivation of sterlet]. Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. 2013. № 2. S. 45-46.
5. Zharkenov D.K., Nevalennyi A.N., Isbekov K.B., Asylbekova S.Zh., Sadykulov T.S., Anuarbekov S.M., Badryzlova N.S. Tekhnologiya vyrashchivaniya foreli na Taintinskom vodokhranilishche v Vostochno-Kazakhstanskoi oblasti [The technology of growing trout on mininskoto reservoir in East Kazakhstan region]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaistvo. 2017. № 4. S. 85-94.
6. Gorina M. A., Gorin A. V., Kozyrev D. L. Modelirovanie dinamicheskikh system [Simulation of dynamic systems]. Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal «Kontsept». – 2017. – Т. 31. – С. 726–730. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/970160.htm>.
7. Aqualine Midgard System [Elektronnyi resurs] <http://www.aqualine.no/en/products/> [data obrashcheniya 10.08.2020].
8. Tikhonov E.A., Ancheev V.A., Maganov I.A., Kuritsyn A.E. Sadok dlya promyshlennogo vyrashchivaniya ryby s sistemoi pod'ema setnoi kamery. Patent RU 160 857. Opublikovano: 10.04.2016.
9. Fish Farm Nets [Elektronnyi resurs] <http://crnetloft.ca/fish-farm-nets> [data obrashcheniya 21.08.2020].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Евгений Андриянович Тихонов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры транспортных, технологических машин и оборудования, Петрозаводский государственный университет, 185000, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33., e-mail: tihonov@psu.karelia.ru

Evgenii A. Tihonov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, Lenina av., 33, Petrozavodsk, 185000, Russian Federation, e-mail: tihonov@psu.karelia.ru

Игорь Владиславович Григорьев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры природообустройства, Арктический государственный агротехнологический университет, 677007, г. Якутск, ш. Сергеляхское 3 км, 3, e-mail: silver73@inbox.ru

Валентин Игоревич Базыкин, кандидат технических наук, научный сотрудник Отдела 3 «Технологии и технические средства в животноводстве», Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 196625, г. Санкт-Петербург, Филътровское шоссе, 3, п. Тярлево, e-mail: valentin-bazykin@mail.ru

Андрей Аркадьевич Шубин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры транспортных, технологических машин и оборудования, Петрозаводский государственный университет, 185000, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33., e-mail: shub@petrsu.ru

Igor V. Grigoryev, Dr.Sci. (Eng), professor, Professor of the Department of Environmental Engineering, Arctic State Agrotechnological University, 677007, Yakutsk, sh. Sergelyakhskoe 3 km, 3, e-mail: silver73@inbox.ru

Valentin I. Bazykin, Ph.D. (Eng.), researcher of the department "Technologies and technical means in animal husbandry", Institute for engineering and environmental problems in agricultural production – branch of Federal state budgetary scientific institution "Federal scientific agroengineering center VIM" (IEEP – branch of FSAC VIM), Filtrovskoe sh, 3, p. Tyarlevo, St. Petersburg, 196625, Russian Federation, e-mail: valentin-bazykin@mail.ru

Andrey A. Shubin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of mining and construction sciences, Petrozavodsk State University, Lenina av., 33, Petrozavodsk, 185000, Russian Federation, e-mail: shub@petrsu.ru



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

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

e-mail: mit-journal@mail.ru <http://morintex.ru>

**ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ
НАУЧНОГО ЖУРНАЛА
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу mit-journal@mail.ru (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта <http://morintex.ru> из раздела «для авторов»

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

**Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"**

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ

Гайкович А.И.

Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

Архипов А.В., Рыбников Н.И.

Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П.А.

Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А.И.

Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**