

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 4 (42) Т.3 2018



ТРУДЫ VI Международного Балтийского морского форума

3-6 сентября 2018 г.

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (42) Т.3 2018 www.morintex.ru

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

Редакционный Совет

Сопредседатели

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

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

Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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

Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта

Огай С. А. к.т.н., доцент ректор, Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация

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

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

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

Журнал включен 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

Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (на диске или по электронной почте: mit-journal@mail.ru)

Учредитель - издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале

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

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (42) V.3 2018 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

Editorial Board

Co-chairmen

I.G. Zakharov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz"

G.A. Turichin, Doctor of Engineering, Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, Chief Researcher Krylov State Research Centre

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Malygin I.G, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

G.N. Muru, PhD, CEO, 51 CCIS

Ogai S.A., PhD, Associate professor, Rector, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre

K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University

S.P. Stoljarov, Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Editorial Staff

Deputy Chief Editors

I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

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

P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor St. Petersburg State Marine Technical University

Yu. A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

Voyloshnikov M.V., Doctor of Engineering, Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation

Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"

V. Yu.Semenova, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University

D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science

N. A Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index <http://vak.ed.gov.ru>

The magazine 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.

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

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008,

Эл № ФС72-3345

Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg

120121, Russian Federation

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

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

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

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

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

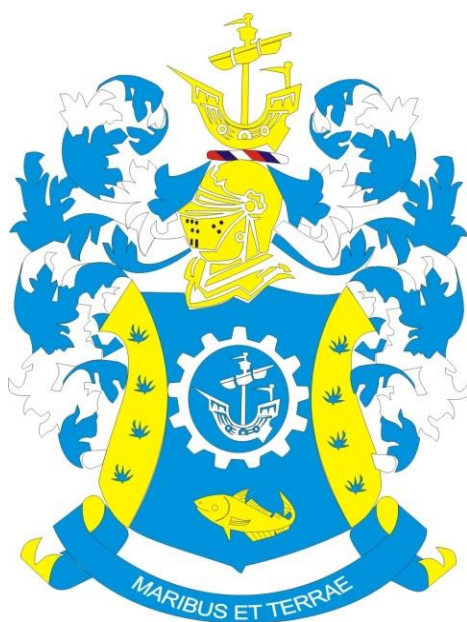
Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



**Калининградский государственный технический
университет**

**Труды
VI Международного
Балтийского морского форума
3-6 сентября, 2018 г.**

Kaliningrad State Technical University

**Proceedings
VI International Baltic Maritime Forum
September 3-6, 2018**



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

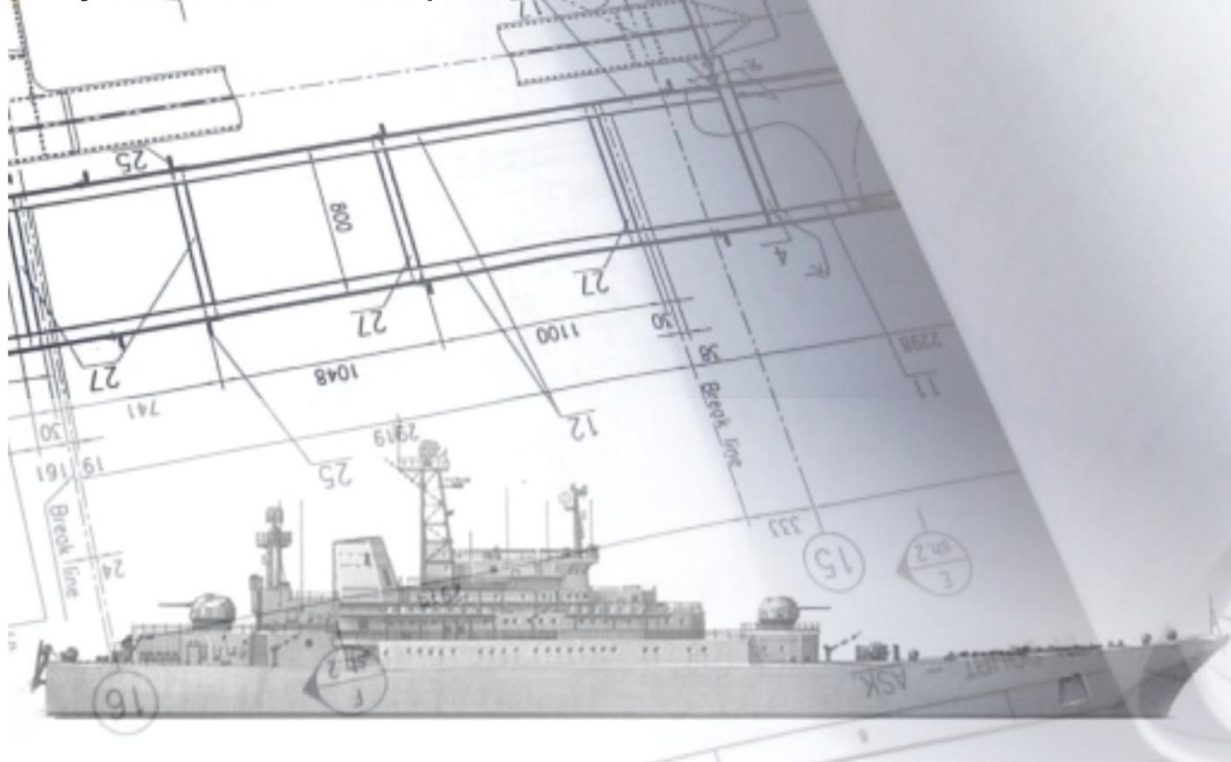
Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1600

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

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

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

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



СОДЕРЖАНИЕ

О журнале	стр 9
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитровский В.А. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения.....	11
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее залипании на встречном волнении.....	19
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мыслик А.В. Учет упругих свойств конструкции при деформировании балок судовых перекрытий в запрелдельном состоянии.....	26
Великанов Н.Л., Шарков О.В. Моделирование остаточных сварочных напряжений в судовых корпусных конструкциях.....	31
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Чуреев Е.А. Исследование формы обводов маломерного рыболовного траулера с целью повышения его мореходных качеств.....	36
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Белей В.Ф., Шапошников А.П. Повышение устойчивости и безопасности энергосистемы Калининградской области и объектов морской индустрии за счет использования накопителей энергии.....	44
Лещинский М.Б., Никулин Т.Р. Адаптация электролизера применительно к условиям судоремонта.....	50
Мыслик А.В. Применение роботизированных электронно-оптических методов при дефектации корпуса судна.....	55
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Архипов М. И., Филонов А.Г., Исследование сепарации капель в жалюзийном сепараторе пара с плоскими пластинами при низких давлениях.....	60
Белей В.Ф., Харитонов М.С., Брижак Р.О. Уточненная методика баланса реактивной мощности судовых электростанций.....	67
Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Формирование косвенных зависимостей для определения тепловых потерь с отработавшими газами судовых четырехтактных двигателей.....	72
Кошелев С.В. Определение недостающих параметров внутреннего микро-оребрения труб при кипении хладагентов в судовых испарителях.....	76
Синявский Н.Я., Мершиев И.Г., Куприянова Г.С. Новые подходы к идентификации и оценке качества судовых топлив и масел.....	82
Синявский Н.Я. Исследование изменений моторного масла в процессе эксплуатации судового двигателя методом ЯМР высокого разрешения.....	91
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	
Кажекин И.Е., Харитонов М.С. Влияние современной полупроводниковой техники на электробезопасность судовых электроэнергетических систем.....	98
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Ермаков С.В., Якута И.В. К вопросу определения погрешностей водоизмещения при снятии осадок методом драфт-сюрвея.....	103
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	109

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В., Морозов Д.Г. Режимное нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса.....	116
Абдулхамид Т., Рудинский И.Д. Технология автоматического распознавания речи как инструментарий формирования англоязычного речевого навыка студентов мореходных направлений подготовки.....	121
Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е. В., Яфасов А.Я. Единая модель хранения данных различных предметных областей для систем поддержки принятия решений.....	127
Мнацаканян А.Г., Огий О.Г. Оценка и управление рисками проектов государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе.....	134

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Алексеева С.М., Руденко А.И. Моделирование оптимального лова рыбной популяции.....	142
Водяхо А.И., Жукова Н.А., Климов Н.В., Луковенкова О.О., Осипов В.Ю., Тристанов А.Б. Вычислительные модели когнитивных систем мониторинга.....	147
Медведев В.В., Еремичева В.Е., Колин А.Д. Математическое моделирование реакции нижней области ионосферы для возмущенных условий.....	154
Наумов В.А. Максимальные расчетные скорости ветра в Балтийской военно-морской базе.....	159
Наумов В.А., Альтшуль Б.А. Динамика системы подъема груза с тремя степенями свободы с использованием синтетического каната.....	164
Мойсеенко С.С., Мороз Е.О. Оптимизация системы транспортного обслуживания рыболовных судов.....	168
Луценко Д.В. Вероятностно-автоматное моделирование электропотребления припортового регионального электротехнического комплекса.....	177

CONTENTS

page
9

About journal

SHIP BUILDING

Evgeniy P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Vladimir A. Dmitrovskiy A mathematical model of collision risk assessment of vessels moving in an arbitrary direction..... 11

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

Evgeniy P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy Calculation of the loading acting on the deck in the bow when it comes to shipping of water in a head sea..... 19

Evgeniy P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy., Artem V. Mysnik On the account of elastic behaviour of the construction under deformation of shipboard beams in off-the-limit condition..... 26

Nikolay L. Velikanov, Oleg V. Sharkov Modeling residual welding voltages in ship hull structures..... 31

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

Evgeniy A. Chureev Study of the geometric shape of a small fishing trawler in an effort to improve its sea-keeping characteristics..... 36

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Valeriy F. Beley, Aleksandr P. Shaposhnikov Improving stability and safety of the energy system of the kaliningrad region and marine industry objects using energy storage units..... 44

Mark B. Leschinskiy, Timofey R. Nikulin. Adaptation of an electrolyser from the perspective of ship-repair..... 50

Artyom V. Mysnik Application of robot-aided electro-optical methods for fault detection of a ship hull..... 55

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Maksim I. Arkhipov, Aleksandr G. Filonov Separation of drops in a curragated scrubber with flat plates at low pressures..... 60

Valeriy F. Beley, Maksim S. Kharitonov, Roman O. Brizhak A refined approach (methodology) for the ship electric power plant reactive power balance calculation..... 67

Leonid I. Kovalchuk, Marina V. Isaeva Formation of indirect dependences for determination of heat losses with exhaust fumes of ship four-cycle engines..... 72

Sergey V. Koshelev Determination of the failed parameters of the internal micro-finining of pipes under boiling of cooling agents in marine distillers..... 76

Nikolay Ya. Sinyavskiy, Ivan G. Mershiev, Galina S. Kupriyanova New approaches to identification and evaluation of the quality of marine fuels and oils..... 82

Nikolay Ya. Sinyavskiy Investigation of changes of motor oil in the process of operation of the ship engine by high-resolution NMR method..... 91

PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION

Ilya E. Kazhekin, Maksim S. Kharitonov Effect of modern semiconductor equipment on electrosafety of shipboard electrical power systems..... 98

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

Sergey V. Ermakov, Irina V. Yakuta Error estimation of water displacement when counting drafts by the draft-survey method..... 103

Ruslan K. Polyakov, Konstantin G. Kuzminov, Nikolaj A. Dolgij 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..... 109

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Viktor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun, Dmitriy V. Lutsenko, Dmitriy G. Morozov Security electricity rationing during the operation of the objects of the regional electrotechnical complex.....	116
Tadzhudin Abdulkhamid, Igor D. Rudinskiy Asr technology as a tool for the development of English speech skill among students pursuing a nautical degree.....	121
Fedor G. Maytakov, Aleksandr A. Merkulov, Evgeniy V. Petrenko, Abdurashid Ya. Yafasov A universal data storage model of various subject areas for decision support systems.....	127
Albert G. Mnatsakanyan, Oksana G. Ogiy Risk assessment and management public-private partnership projects in the fisheries.....	134

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Svetlana M. Alekseeva, Alexey I. Rudenko Modeling of optimum fishing population.....	142
Aleksandr I. Vodyakho, Natalia A. Zhukova, Nikolay V. Klimov, Olga O. Lukovenkova, Vasiliy Yu. Osipov, Aleksandr B. Tristanov Computational models of cognitive monitoring systems.....	147
Vladimir V. Medvedev, Viktoriya E. Eremicheva, Anton D. Kolin Mathematical modeling of the reactions of the lower ionospheric region for disturbed conditions.....	154
Vladimir A. Naumov Maximum rated wind speeds in the Baltic naval base.....	159
Vladimir A. Naumov, Boris A. Altshul Dynamics of a ternary load lifting system with the use of a synthetic rope.....	164
Sergey S. Moyseenko, Evgeniy O. Moroz Optimization of the transport service system of fishing vessels.....	168
Dmitry V. Lutsenko Probabilistic-automatic modeling electric power consumption of the portal regional electrotechnical complex.....	177

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» – это электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание.

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

Журнал включен 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.

Наш журнал включен в международную реферативную базу данных Web of Science.

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте www.morintex.ru

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2015 года и с № 4(30) 2015 полные выпуски размещены в научной электронной библиотеке.

Подписной индекс 99366 в «Межрегиональном агентстве подписки» (МАП).

Журнал распространяется посредством подписки в МАП 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 (по отраслям)	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

ABOUT JOURNAL

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

The magazine 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.

Our log is included in the international abstract Web of Science database.

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

The magazine 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.

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

BY the organizations' request the magazine editorial office can send any magazine issue or the whole set of magazines in general.

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers according to the list of Supreme Attestation Commission: 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).

Basic Magazine Trends

- Intelligent technologies for designing of ships and vessels, computing of design process (control and organization of designing, automated designing systems). Marine History and Equipment.
- Intelligent technologies for ship and vessel building (advanced technologies for ship building, automated systems of production preparation, robot using).
- Intelligent technologies for ship and vessel operation (ship and vessel automation systems, automated control systems, problems in ergonomics, ecology).
- Intelligent technologies in applied researches (mathematical modelling and computer experiment, theory of structures, aerohydrodynamics, thermodynamics, physical fields of ship).
- Intelligent technologies in marine and ship power engineering. Energy-saving technologies.
- Intelligent technologies of marine instrument engineering.
- Artificial intelligence in marine technologies.
- Intelligent technologies in marketing researches • Intelligent technologies in logistics

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 656.61.052

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА СТОЛКНОВЕНИЯ В ПОТОКЕ СУДОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ**Евгений Петрович Бураковский**

доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Павел Евгеньевич Бураковский

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Владимир Алексеевич Дмитровский

кандидат физико-математических наук, главный специалист по архитектуре программных комплексов
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: vdmmitrovsky@mail.ru

Аннотация

Предлагаемая работа является продолжением серии предыдущих статей авторов, посвящённых определению вероятностей столкновения в так называемых "неуправляемых" моделях движения судов. Все рассмотренные в них модели объединяли одинаковые под-модели потоков судов и их столкновений: потоки судов всегда полагались пуассоновскими, а столкновения – "прозрачными", то есть сам факт столкновения фиксировался, но суда продолжали своё движение, не меняя своих характеристик. Под-модели же судов в каждой из рассмотренных моделей были разные. Это позволило получить универсальный результат для опасности столкновения судов D следующего вида: $D=I*M$, где I – интенсивность потока судов, а M – математическое ожидание некоей случайной площади, зависящей только от случайных характеристик судов. Под характеристиками судов всегда понимались их длина, ширина и скорость. В настоящей работе впервые в качестве основной характеристики судов выбрано направление их движения. Показано, что и в этой модели справедлива указанная формула для опасности столкновений. При этом, во избежание чрезвычайно громоздких в общем случае результатов, ширины всех судов полагались нулевыми.

Ключевые слова: математическая модель, опасность столкновения, вероятность, случайная величина, пуассоновское поле, столкновение, интенсивность, распределение скоростей, распределение длин

A MATHEMATICAL MODEL OF COLLISION RISK ASSESSMENT OF VESSELS MOVING IN AN ARBITRARY DIRECTION**Evgeniy P. Burakovskiy**

DSc in Engineering, Professor at the Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Navigation Safety
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Vladimir A. Dmitrovskiy

PhD in Physics and Mathematics, chief software architect
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: vdmmitrovsky@mail.ru

Abstract

The proposed work is a continuation of a series of the authors' previous articles devoted to determination of collision probabilities in the so-called “uncontrolled” models of vessel traffic. All the models considered in them combined the same sub-models of the ship flows and their collisions: the ship flows were always considered Poisson, and the collisions were “transparent”, that is, the fact of the collision was recorded, but the vessels continued their movement without changing their characteristics. The sub-models of vessels in each of the models considered were different. This made it possible to obtain a universal result for the danger of collisions of vessels D of the following form: $D = I * M$, where I is ship flow intensity, and M is mathematical expectation of a certain random area depending only on the random characteristics of the ships. Characteristics of vessels have always been understood as their length, width and speed. In this paper, for the first time ever, movement direction has been chosen as the main characteristic of the vessels. It is shown that the indicated formula for the danger of collisions is valid in this model as well. At the same time, in order to avoid extremely cumbersome results in the general case, the widths of all vessels were assumed to be zero.

Key words: mathematical model, danger of collision, probability, random value, Poisson field, collision, intensity, velocity distribution, length distribution

Введение

Столкновения судов являются одним из наиболее распространенных видов аварий на судах мирового флота, поэтому необходимо располагать математическим аппаратом, позволяющим оценить риски таких происшествий [8]. В работах [2, 7] была предложена вероятностная модель движения судов встречными курсами. В работе [3] была рассмотрена задача перпендикулярного пересечения судном фарватера с интенсивным судоходством. В статье [4] представлена математическая модель, аналогичная модели работы [3], но для случая движения судов параллельными курсами (во встречном и попутном направлении). В [6] была предложена общая вероятностная модель движения судна в потоке прочих судов, при этом рассмотрены случаи встречного и попутного потока, а также пересечения фарватера под некоторым углом. В настоящей работе предлагается вероятностная модель оценки риска столкновения судов при движении судна в потоке прочих судов с произвольным направлением движения, называемого далее произвольным потоком (рис. 1), с целью анализа вероятностей безаварийного плавания судна в течение некоторого интервала времени T .

1. Постановка проблемы

Весь анализ будет проводиться с точки зрения одного судна, которое мы для простоты будем называть просто нашим. Все остальные суда будем называть прочими. Если нам потребуется проанализировать поведение какого-либо одного конкретного прочего судна, будем называть его выделенным.

Все суда, включая наше, будем считать неуправляемыми.

Общую модель составляют три её части:

1. модель потока прочих судов,
2. модель судов,
3. модель столкновения судов.

Для неё будет выведена общая формула для вероятности безаварийного движения нашего судна в течение некоторого интервала времени T .

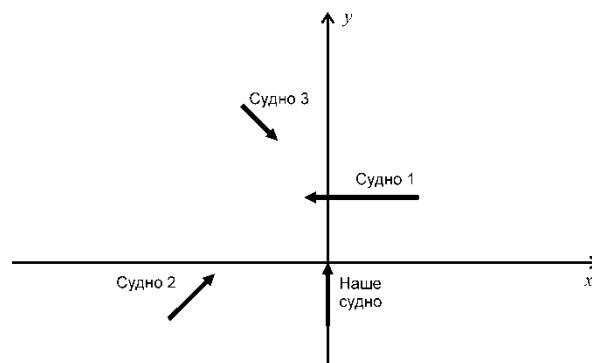


Рис. 1. Схема движения в произвольном потоке

2. Модель потока прочих судов

Вся акватория мирового океана в нашей модели будет представляться бесконечной плоскостью с декартовой системой координат.

В момент времени $t = 0$ координаты нашего судна совпадают с их началом – $(0,0)$, а координаты прочих судов образуют однородное пуассоновское поле с плотностью интенсивности I , то есть

1. Для любой части акватории площадью S квадратных миль вероятность того, что в ней находится ровно N прочих судов, $N = 0,1,2,...$, вычисляется по формуле Пуассона:

$$\frac{(I \cdot S)^N}{N!} \exp \{-I \cdot S\}.$$

2. Для любого количества $K = 2,3,...$ взаимно не пересекающихся частей акватории количества прочих судов, попавших в каждую часть, есть случайные величины, независимые в совокупности и не зависящие от характеристик всех прочих судов.

Практический смысл плотности интенсивности I – это среднее число прочих судов в части акватории площадью в одну квадратную милю.

3. Модель судов

Под судном в нашей модели будет пониматься отрезок, длина которого равна длине судна, а ориентация соответствует его курсу. Стрелкой обозначен нос судна, т.е. направление его движения, а остриём стрелки – его координаты. Под фразой “судно находится в ...”, будет пониматься

“координаты судна находятся в ...”. Кормой будет называться конец отрезка, противоположный носу, а бортами – внутренняя часть отрезка (без носа и кормы).

Скорость и длину нашего судна обозначим V и L соответственно, они будут называться характеристиками нашего судна $\vec{H} = (V, L)$. В начальный момент времени координата нашего судна равна $(0,0)$, следует он в направлении оси y .

Характеристики прочих судов – их случайные скорость, длину и угол между вектором скорости и осью x будем обозначать v, λ и α соответственно, а их в совокупности – $\vec{\chi} = (v, \lambda, \alpha)$. v и λ неотрицательные, хотя могут равняться 0 с ненулевой вероятностью, $-\pi < \alpha \leq \pi$. На Рис. 1 для трёх прочих судов $\alpha_1 = \pi, \alpha_2 = \pi/4, \alpha_3 = -\pi/4$.

Угол α будем называть курсом судна, а прямую $y = \tan(\alpha) \cdot x + b$ – его траекторией. Здесь b – некоторая константа, соответствующая траектории судна. Траектория любого прочего судна пересекает траекторию нашего (ось y) в точке $(0, b)$.

Характеристики всех прочих судов независимы в совокупности и имеют одинаковую совместную функцию распределения $F_{\vec{\chi}}(\vec{h})$, где $\vec{h} = (v, l, a)$. Обозначим их маргинальные функции распределения так:

$$F_v(v) = \iint_{\substack{l \geq 0 \\ -\pi < a \leq \pi}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \quad (1)$$

$$F_\lambda(l) = \iint_{\substack{v \geq 0 \\ -\pi < a \leq \pi}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \quad (2)$$

$$F_\alpha(a) = \iint_{\substack{v \geq 0 \\ l \geq 0}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \quad (3)$$

$$F_{v,\lambda}(v, l) = \int_{-\pi < a \leq \pi} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \quad (4)$$

$$F_{v,\alpha}(v, a) = \int_{l \geq 0} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \quad (5)$$

$$F_{\lambda,\alpha}(l, a) = \int_{v \geq 0} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}). \quad (6)$$

Интегралы в правых частях этих формул, записанные в непривычной нотации, – это так называемые интегралы Лебега-Стилтьеса по соответствующим переменным, указанным в условиях интегрирования. В таком виде эти формулы справедливы даже в случаях, когда характеристики не имеют плотности распределения.

Если же распределение характеристик абсолютно непрерывно, то есть для него существует такая функция $f_{\vec{\chi}}(v, l, a)$, называемая плотностью распределения характеристик, что

$$F_{\vec{\chi}}(\vec{h}) = \int_0^v \int_0^l \int_{-\pi}^a f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw \quad \text{для любых}$$

$v \geq 0, l \geq 0, -\pi < a \leq \pi$, эти формулы могут быть переписаны в более привычном (но более громоздком) виде:

$$F_v(v) = \int_0^v \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw, \quad (7)$$

$$F_\lambda(l) = \int_0^l \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw, \quad (8)$$

$$F_\alpha(a) = \int_0^\infty \int_0^a \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw, \quad (9)$$

$$F_{v,\lambda}(v, l) = \int_0^v \int_0^l \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw, \quad (10)$$

$$F_{v,\alpha}(v, a) = \int_0^v \int_0^\infty \int_{-\pi}^a f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw, \quad (11)$$

$$F_{\lambda,\alpha}(l, a) = \int_0^l \int_0^\infty \int_{-\pi}^a f_{\vec{\chi}}(w, m, s) ds dm dw. \quad (12)$$

Кроме того, маргинальные плотности распределения можно будет записать так:

$$f_v(v) = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(v, l, s) ds dl, \quad (13)$$

$$f_\lambda(l) = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(v, l, s) ds dv, \quad (14)$$

$$f_\alpha(a) = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{\vec{\chi}}(v, l, a) dl dv, \quad (15)$$

$$f_{v,\lambda}(v, l) = \int_{-\pi}^\pi f_{\vec{\chi}}(v, l, s) ds, \quad (16)$$

$$f_{v,\alpha}(v, a) = \int_0^\infty f_{\vec{\chi}}(v, l, a) dl, \quad (17)$$

$$f_{\lambda,\alpha}(l, a) = \int_0^\infty f_{\vec{\chi}}(v, l, a) dv. \quad (18)$$

В случае если скорости, длины и курсы судов независимы в совокупности,

$$F_{\vec{\chi}}(\vec{h}) = F_v(v) \cdot F_\lambda(l) \cdot F_\alpha(a). \quad (19)$$

Потребуем существования математических ожиданий скоростей и длин:

$$M_v = \int_{v \geq 0} v dF_v(v), \quad (20)$$

$$M_\lambda = \int_{l \geq 0} l dF_\lambda(l). \quad (21)$$

Длины всех судов, естественно, постоянны во времени. Этого же потребуем от их скоростей и курсов.

Кроме этих основных характеристик, в зависимости от особенностей конкретных моделей, нас будут интересовать и некоторые производные (выражаемые через основные) характеристики. Для них мы также будем предполагать существование математических ожиданий.

4. Модель столкновения судов

Для решения задачи нам так же необходимо определить, в чём заключается сам факт столкновения судов.

Под столкновением прочего судна с нашим мы будем понимать пересечение их контуров в том или ином виде. В зависимости от особенностей частных моделей, это определение может уточняться, а сами столкновения – классифицироваться.

В обычном понимании этого слова после столкновения суда, в зависимости от тяжести полученных повреждений,

1. тонут, иногда подолгу оставаясь на плаву;
2. остаются на плаву, подолгу дрейфуя под действием течений и ветра в произвольном направлении в ожидании помощи;
3. изменяют направление движения, и малым ходом идут в ближайший порт;
4. продолжают своё движение в прежнем направлении, возможно – с меньшей скоростью.

Очевидно, что всё разнообразие последствий столкновений просто невозможно описать в простой математической модели. Поэтому договоримся о следующем:

При столкновении сам его факт фиксируется, но суда продолжают своё движение, не изменяя ни его направления, ни скорости. Суда как бы проходят одно сквозь другое не взаимодействуя.

На первый взгляд, такая модель выглядит странно. В самом деле, в этой модели вероятность столкновения нашего судна с неким выделенным прочим судном вовсе не равна вероятности их столкновения в обычном понимании. Ведь до их столкновения наше судно могло столкнуться с другими судами, что в реальности не позволило бы нашему судну столкнуться с выделенным.

Однако, вероятности того, что наше судно не столкнётся ни с одним из прочих, и в нашей модели, и в обычном понимании этого слова равны. Поскольку нас интересует именно эта вероятность, выбранная модель не противоречит нашей конечной цели.

С другой стороны, эта модель позволяет избежать чрезвычайно громоздких промежуточных выкладок. Так, вместо фразы “вероятность столкновения нашего и выделенного судна” с очень простой формулой для этой вероятности, нам, при обычном понимании этого события, придётся использовать фразу “вероятность столкновения нашего и выделенного судов при условии, что до этого наше не столкнётся ни с одним из других прочих судов”. Громоздкость формулы для этой условной вероятности сделает текст выкладок просто нечитаемым.

Иными словами, выбор этой модели объясняется тем, что, не жертвуя корректностью окончательных результатов, мы резко упрощаем промежуточные, не существенные для нас, выкладки.

5. Общая формула опасности столкновения

В работе [6] было введено понятие опасности столкновения:

$$D(\vec{H}, T) = -\ln \bar{P}(\vec{H}, T), \quad (22)$$

где $\bar{P}(\vec{H}, T)$ – вероятность избежать столкновения нашего судна, имеющего характеристики \vec{H} , с любым прочим за время T .

Там же было показано, что для рассматриваемых там моделей

$$D(\vec{H}, T) = I \cdot M(\Sigma(\vec{H}, \vec{\chi}, T)), \quad (23)$$

где I – плотность потока прочих судов, $M(\Sigma(\vec{H}, \vec{\chi}, T))$ – математическое ожидание случайной площади $\Sigma(\vec{H}, \vec{\chi}, T)$, а $\Sigma(\vec{H}, \vec{h}, T)$ – площадь области акватории $\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T)$ такой, что суда, находящиеся в ней, и имеющие характеристики \vec{h} , обязательно столкнутся с нашим судном, имеющим характеристики \vec{H} , за период времени T [1].

Легко показать, что эта же формула будет справедлива и для рассматриваемых здесь произвольных потоков прочих судов – доказательство этого слово в слово повторяет доказательство для неограниченных потоков в работе [6].

6. Опасность столкновения для произвольных потоков

Нам надо определить область $\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T)$, и найти её площадь.

Очевидно, что столкновение заключается в том, что

1. либо наше судно таранит в борт выделенное,
2. либо выделенное судно таранит в борт наше.

Назовём эти варианты таранами I-го и II-го типов соответственно.

Имеет смысл отдельно выделить три типа событий, которые, хотя и имеют нулевую вероятность, являются “пограничными” между двумя типами таранов или между столкновением и безаварийным расхождением судов:

1. таран “нос-в-нос”. Это событие является одновременно тараном, как первого, так и второго типов в силу симметричности ролей судов при таком столкновении;
2. таран выделенного судна нашим в корму. Назовём его касанием первого типа;
3. таран нашего судна выделенным в корму. Назовём его касанием второго типа.

Обозначим координаты выделенного судна (x_0, y_0) . Очевидно, что столкновение может произойти только в точке пересечения курсов $(0, y_0 - x_0 \cdot \tan(\alpha))$.

Определим следующие моменты прохождения точки пересечения носом нашего судна

$$t_{H,H} = (y_0 - x_0 \cdot \tan(\alpha)) / V, \quad (24)$$

носом выделенного судна

$$t_{B,H} = -x_0 / (v \cdot \cos(\alpha)), \quad (25)$$

кормой нашего судна

$$t_{H,K} = (y_0 - x_0 \cdot \tan(\alpha) + L) / V, \quad (26)$$

кормой выделенного судна

$$t_{B,K} = (-x_0 + l \cdot \cos(\alpha)) / (v \cdot \cos(\alpha)). \quad (27)$$

Момент столкновения (если оно произошло) обозначим t_C . Потребуем сначала, чтобы он был строго положительным ($t_C > 0$). Смысл этого требования станет ясен ниже при определении вероятности мгновенного столкновения. Таким образом,

$$0 < t_C \leq T. \quad (28)$$

Условиями тарана первого типа будут

$$t_{B,H} < t_{H,H} < t_{B,K}, \quad (29)$$

т.е. нос нашего судна попадает в точку пересечения позже носа, но ранее кормы выделенного судна. При этом $t_C = t_{H,H}$.

Условиями тарана II-го типа будут

$$t_{H,H} < t_{B,H} < t_{H,K}, \quad (30)$$

т.е. нос выделенного судна попадает в точку пересечения позже носа, но ранее кормы нашего судна. При этом $t_C = t_{B,H}$.

Условиями пограничных событий будут: для касания первого типа

$$t_{H,H} = t_{B,K}, \quad (31)$$

для тарана «нос-в-нос»

$$t_{H,H} = t_{B,H}, \quad (32)$$

для касания второго типа

$$t_{H,K} = t_{B,H}. \quad (33)$$

Они определяют три параллельные прямые, делящие акваторию на четыре части:

$$\begin{cases} y = x \cdot k + l \cdot V / v, \\ y = x \cdot k, \\ y = x \cdot k - L, \end{cases} \quad (34)$$

где $k = (\tan(a) - V / (v \cdot \cos(a)))$. Эти части акватории характеризуются следующими результатами. Если координаты выделенного судна лежат

- выше первой прямой, оно пройдет перед носом нашего судна, столкновения не будет;
- выше второй прямой, но ниже первой, – может быть таран I-го типа;
- выше третьей прямой, но ниже второй, – может быть таран II-го типа;
- ниже третьей прямой, оно пройдет позади кормы нашего судна, столкновения не будет.

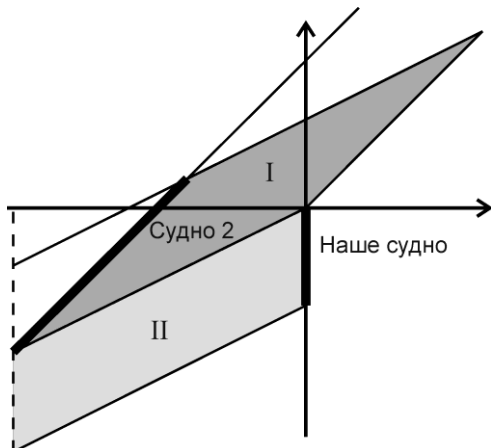


Рис. 2. Курс судна $a = \pi/4$

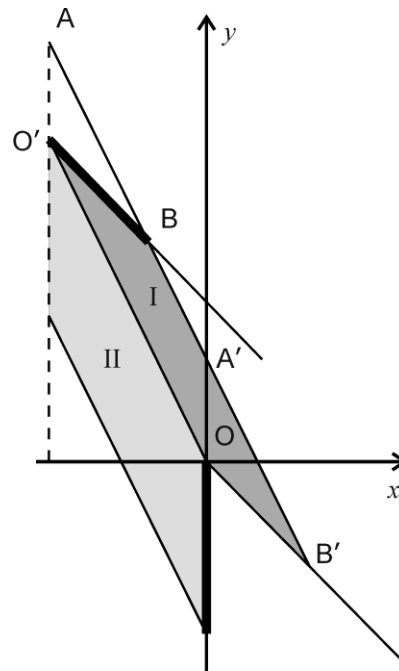


Рис. 3. Курс судна $a = -\pi/4$

Вначале рассмотрим случай $a \in [-\pi/2, \pi/2]$.

При этом $\cos(a) \geq 0$.

Для тарана I-го типа, подставляя в условия (29) определения (24),(25),(27), получим:

$$x \cdot k < y < x \cdot k + l \cdot V / v. \quad (35)$$

Условия (28) дают ещё два ограничения:

$$x \cdot \tan(a) < y < x \cdot \tan(a) + V \cdot T. \quad (36)$$

Окончательно, полный набор ограничений образует параллелограмм (на рис. 2, 3 имеет тёмно-серый фон):

$$\begin{cases} y > x \cdot \tan(a), \\ y > x \cdot k, \\ y < x \cdot \tan(a) + V \cdot T, \\ y < x \cdot k + l \cdot V / v. \end{cases} \quad (37)$$

Чтобы найти его площадь, заметим, что треугольник $A'B'O$ конгруэнтен треугольнику ABO' . Следовательно, площадь параллелограмма $AB'O'O'$ равна площади параллелограмма $AA'O'O'$, которая равна

$$\begin{aligned} \Sigma_{+,l} &= (T \cdot v \cdot \cos(a)) \cdot (l \cdot V / v) = \\ &= T \cdot V \cdot l \cdot \cos(a). \end{aligned} \quad (38)$$

Для тарана II типа условия (30) определения соответствующих моментов (24), (25), (26), после преобразований получим

$$x_0 \cdot k - L < y_0 < x_0 \cdot k. \quad (39)$$

Условия (28) дают ещё два ограничения:

$$-T \cdot v \cdot \cos(a) < x_0 < 0. \quad (40)$$

Окончательно, полный набор ограничений образует параллелограмм:

$$\begin{cases} x_0 > -T \cdot v \cdot \cos(a), \\ x_0 < 0, \\ y_0 > x_0 \cdot k - L, \\ y_0 < x_0 \cdot k. \end{cases} \quad (41)$$

Его площадь

$$\Sigma_{+,II}(\vec{H}, \vec{h}, T) = T \cdot L \cdot v \cdot \cos(a). \quad (42)$$

Здесь знак "плюс" в индексе площади обозначает знак $\cos(a)$.

Совершенно аналогично, в силу зеркальной симметричности модели, для $a \in [\pi/2, \pi]$ и $a \in [-\pi, -\pi/2]$ ($\cos(a) \leq 0$) получим

$$\Sigma_{-,I}(\vec{H}, \vec{h}, T) = -T \cdot V \cdot l \cdot \cos(a) \quad (43)$$

и

$$\Sigma_{-,II}(\vec{H}, \vec{h}, T) = -T \cdot L \cdot v \cdot \cos(a). \quad (44)$$

Объединяя результаты, получим формулы для опасностей столкновения обоих типов:

$$D_I(H, T) = I \cdot T \cdot V \cdot M(\lambda \cdot |\cos(\alpha)|), \quad (45)$$

$$D_{II}(H, T) = I \cdot T \cdot L \cdot M(v \cdot |\cos(\alpha)|), \quad (46)$$

где M – символ математического ожидания соответствующих произведений случайных величин.

Если α равномерно распределена на окружности $[-\pi, \pi]$, и скорости прочих судов не зависят от их курсов, формулы упрощаются:

$$D_I(H, T) = 2 \cdot I \cdot T \cdot V \cdot M_\lambda / \pi, \quad (47)$$

$$D_{II}(H, T) = 2 \cdot I \cdot T \cdot L \cdot M_v / \pi. \quad (48)$$

7. Опасность мгновенного столкновения

Но рассматриваемая модель подразумевает ещё один источник опасности столкновений – так называемые "мгновенные" столкновения. Они происходят, когда в момент времени 0 наше судно уже находится в процессе столкновения, т.е. его отрезок пересечён отрезками как минимум одного прочего судна.

На самом деле, эти столкновения происходят не в момент $t = 0$, а в недавнем прошлом. При $t = 0$ мы лишь наблюдаем его последствия. Однако при достаточно большом значении T опасностью мгновенного столкновения можно пренебречь.

8. Расчетный пример

Суммарную опасность столкновения, включающую в себя опасности столкновения обоих типов, можно определить из выражения

$$D = D_I(H, T) + D_{II}(H, T). \quad (49)$$

Рассмотрим сначала случай равномерного распределения α на окружности $[-\pi, \pi]$, т.е. для оценки опасности столкновения воспользуемся формулами (47) и (48). Пусть скорость нашего судна $V = 12$ узлов, а длина – $L = 100$ м, математическое ожидание скоростей и длин прочих судов $M_v = 15$ узлов и $M_\lambda = 120$ м соответственно. Результаты расчета опасности столкновения для ряда значений интенсивности пуассоновского поля судов представлены на рис. 4.

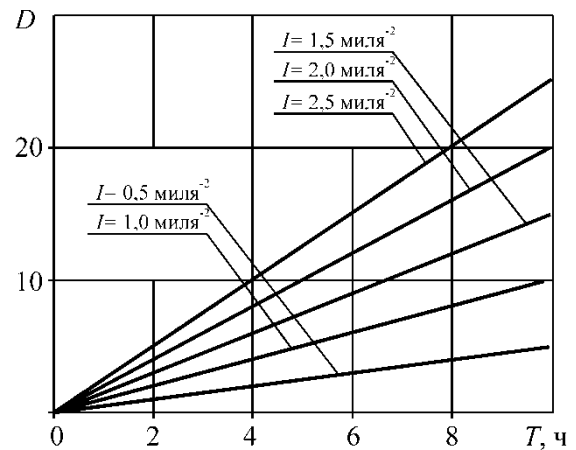


Рис. 4. Зависимость опасности столкновения от времени при равномерном распределении курсового угла α

Весьма характерным является такое распределение направлений движения судов, когда некоторые из курсов являются доминирующими в рассматриваемом районе, при этом в первом приближении можно принять, что скорости и длины судов не зависят от их курсов. В качестве примера рассмотрим случай, когда преобладают два направления движения судов, а плотность распределения α определяется выражением:

$$f_\alpha(a) = b \cdot \frac{c_1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(a - M_{\alpha 1})^2}{2 \cdot \sigma_1^2}\right] + (1 - b) \cdot \frac{c_2}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(a - M_{\alpha 2})^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right], \quad (50)$$

где

$$c_1 = \frac{1}{\Phi\left[\frac{\pi - M_{\alpha 1}}{\sigma_1}\right] - \Phi\left[\frac{-\pi - M_{\alpha 1}}{\sigma_1}\right]}, \quad (51)$$

$$c_2 = \frac{1}{\Phi\left[\frac{\pi - M_{\alpha 2}}{\sigma_2}\right] - \Phi\left[\frac{-\pi - M_{\alpha 2}}{\sigma_2}\right]}, \quad (52)$$

а $\Phi(x)$ – функция нормированного нормального распределения.

С учетом принятых допущений формулы для опасностей столкновения обоих типов примут вид:

$$\begin{aligned} D_I(H, T) &= I \cdot T \cdot V \cdot M_\lambda \cdot M(|\cos(\alpha)|) = \\ &= I \cdot T \cdot V \cdot M_\lambda \cdot \int_{-\pi}^{\pi} |\cos(a)| \cdot f_\alpha(a) da, \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} D_{II}(H, T) &= I \cdot T \cdot L \cdot M_v \cdot M(|\cos(\alpha)|) = \\ &= I \cdot T \cdot L \cdot M_v \cdot \int_{-\pi}^{\pi} |\cos(a)| \cdot f_\alpha(a) da. \end{aligned} \quad (54)$$

Выполним расчет по формулам (49), (53) и (54) с использованием данных предыдущего примера и следующих параметров распределения α :

$$M_{\alpha 1} = -\frac{\pi}{2}, \quad M_{\alpha 2} = \frac{\pi}{2}, \quad \sigma_1 = 0,6, \quad \sigma_2 = 0,6, \quad b = 0,5.$$

График плотности распределения $f_{\alpha}(a)$ представлен на рис. 5, результаты расчета вероятности безаварийного плавания нашего судна – на рис. 6.

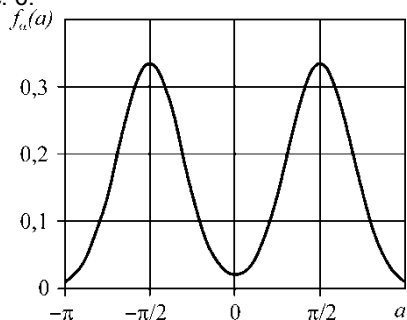


Рис. 5. Плотность распределения α

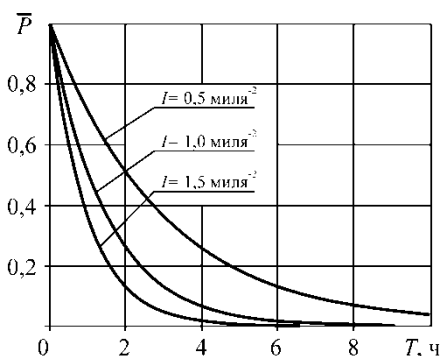


Рис. 6. Зависимость вероятности безаварийного плавания от времени

Заключение

Предложенная математическая модель позволяет оценить степень опасности того или иного трафика, что дает возможность обосновывать конструктивные решения при постройке и модернизации судов для снижения последствий их столкновений, например, за счет использования податливых бульбовых надделок [2, 5]. Данная модель также позволяет сделать некоторые предварительные выводы относительно влияния характера движения судов на безопасность мореплавания.

Для оценки вероятности столкновения реальных судов, управляемых человеком, необходимо ввести соответствующие поправки, определяемые "человеческим фактором", однако это отдельная, самостоятельная задача исследования, выходящая за рамки настоящей статьи.

Литература

1. Амбарцумян, Р.В. Введение в стохастическую геометрию / Р.В. Амбарцумян, Й. Мекке, Д. Штойян. М.: Наука, 1989. 400 с.
2. Бураковский, Е.П. Конструктивное обеспечение повышения безопасности мореплавания при столкновении судов / Е.П. Бураковский, В.А. Дмитриевский, И.В. Якута // Морской вестник. СПб.: Мор Вест. 2007. №3(23). С.100-106.
3. Бураковский, Е.П. К вопросу оценки риска столкновения судов / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии. 2015. №4. С.35-39.
4. Бураковский, Е.П. Математическая модель столкновения судов, движущихся параллельными курсами / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3, Т. 1. С.23-28.
5. Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных мероприятий по снижению последствий столкновений судов / П.Е. Бураковский // Морской вестник. 2017. Спецвыпуск №1(13). С.36-38.
6. Бураковский, Е.П. Математическая модель столкновения судов при движении произвольными курсами / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017. №4, Т. 2. С.12-26.
7. Burakovskiy, E.P. To the question of navigation safety at ship collision / E.P. Burakovskiy, V.A. Dmitrovskiy, I.V. Yakuta // Archives of Civil and Mechanical Engineering. Wroclaw. 2007. Quarterly Vol. VII. No.3. P. 79-89.
8. Smalko, Z. Modelling a ship safety according to collision threat for ship routes crossing / Z. Smalko, L. Smolarek // Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 2010. No. 20(92). P. 120-127.

References

1. Ambartsumyan R.V, Mekke Y., Shtoyyan D. Vvedenie v stokhasticheskuyu geometriyu (Introduction to stochastic geometry). Moscow, 1989, 400 p.
2. Burakovskiy E.P, Dmitrovskiy V.A., Yakuta I.V. (2007). Konstruktivnoe obespechenie povysheniya bezopasnosti moreplavaniya pri stolknoventii sudov (Constructive provision for improving the safety of navigation in ship collisions). Morskoy vestnik, №3(23), pp.100–106.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. (2015). K voprosu otsenki riska stolknoventiya sudov (To the question of ship collisions risk calculation). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4, pp. 35–39.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. (2017). Matematicheskaya model' stolknoventiya sudov, dvizhushchikhsya parallel'nymi kursami (Mathematical model of collision of vessels moving in parallel courses). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №3, vol. 1, pp. 23–28.

-
5. Burakovskiy P.E. (2017). Razrabotka konstruktivnykh meropriyatiy po snizheniyu posledstviy stolknoveniy sudov (Development of constructive measures to reduce the impact of ship collisions). Morskoy vestnik, special issue №1(13), pp.36–38.
 6. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. (2017). Matematicheskaya model' stolknoveniya sudov pri dvizhenii proizvol'nymi kursami (Mathematical model of collision of ships during the random courses movement). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4, vol. 2, pp. 12–26.
 7. Burakovskiy E.P., Dmitrovskiy V.A., Yakuta I.V. (2007). To the question of navigation safety at ship collision. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Quarterly Vol. VII, No.3, pp. 79–89.
 8. Smalko Z., Smolarek L. (2010). Modelling a ship safety according to collision threat for ship routes crossing. Scientific Journals Maritime University of Szczecin, No. 20(92), pp. 120–127.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.144

**К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ
НА ПАЛУБУ СУДНА В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ ПРИ ЕЕ ЗАЛИВАНИИ
НА ВСТРЕЧНОМ ВОЛНЕНИИ****Евгений Петрович Бураковский**

доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Павел Евгеньевич Бураковский

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Аннотация

Гибель судов в условиях штормового моря была и остается весьма распространенным явлением, при этом возникновение ряда катастроф может быть объяснено реализацией механизма захвата волной носовой оконечности судна на встречном волнении. Настоящая работа посвящена проблеме обеспечения безопасности судов в штормовых условиях. Получены уравнения нелинейной качки судна с учетом заливания носовой оконечности на встречном волнении. Выполнено математическое моделирование продольной качки судна на встречном волнении. Исследовано влияние высоты волны, высоты надводного борта и скорости хода судна на величину гидродинамических нагрузок, действующих на палубу в носовой оконечности. Выявлено, что возникающая при зарывании носовой оконечности в воду гидродинамическая сила может привести к опрокидыванию судна, а также к разрушению его корпуса. Результаты теоретического расчета были проверены экспериментальными исследованиями. В результате проведения испытаний модели в опытовом бассейне получено экспериментальное подтверждение возникновения значительных гидродинамических нагрузок при движении судна на развитом встречном волнении с заливанием носовой оконечности, что приводит к потере остойчивости судна. Показано, что снизить вероятность гибели судов возможно как путем разработки эффективных успокоителей продольной качки, позволяющих ограничить глубину «зарывания» носовой оконечности судна в воду, так и ограничения гидродинамической силы за счет изменения архитектуры судов в носовой оконечности.

Ключевые слова: вертикальная качка, килевая качка, заливание палубы, встречное волнение, гидродинамическая нагрузка, потеря остойчивости, опрокидывание, крен, дифферент.

**CALCULATION OF THE LOADING ACTING ON THE DECK IN THE BOW
WHEN IT COMES TO SHIPPING OF WATER IN A HEAD SEA****Evgeniy P. Burakovskiy**

DSc in Engineering, Professor at the Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Navigation Safety
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Abstract

Ship wrecks in a stormy sea has been very common, and the occurrence of a number of catastrophes can be explained by wave run-up of the ship bow in a head sea. This paper is devoted to the problem of ensuring ship safety in storm conditions. The equations of non-linear ship's motions have been obtained taking into account flooding of the bow in a head sea. Mathematical modeling has been performed of the longitudinal pitching in a head sea. The influence of the wave height, the height

of the freeboard and the speed of the vessel on the amount of hydrodynamic loading acting on the deck in the bow has been investigated. It has been revealed that the hydrodynamic force that occurs when the bow is being dipped in water can lead to capsizing, as well as to destruction of its hull. The results of theoretical calculations have been verified by experimental studies. As a result of testing the model in the experimental tank, experimental evidence has been obtained for the occurrence of significant hydrodynamic loads when the vessel is moving in an arisen sea, with a wave run-up of the bow that leads to stability loss of the vessel. It has been shown that the likelihood of ship wrecks can be reduced through the development of effective stabilizers against pitching, which allow limiting the depth of the bow dipping in the water and limiting hydrodynamic force by changing the architecture of the bow sections.

Key words: heaving, pitching, shipping of water, head sea, hydrodynamic loading, stability loss, capsizing, heel, trim difference.

Введение

Одной из главных причин гибели судов, попавших в шторм, является генерирование гидродинамических сил непосредственно на палубе судов в их носовой оконечности. Это усилие, как уже было показано в ряде работ авторов, приводит либо к разрушению корпусов судов, либо к их опрокидыванию [3, 4, 5, 7]. Для каждого типа судна величина опасных усилий различна и зависит от водоизмещения судна, метацентрической высоты и т.д. Поэтому крайне важно уметь оценивать величину этих гидродинамических усилий. Такая процедура может быть осуществлена из рассмотрения уравнений килевой и вертикальной качки судов в условиях зарывания их носовой оконечности в воду.

1. Моделирование поведения судна на регулярном встречном волнении

Рассмотрим качку судна при движении на встречном волнении. В соответствии с [2] введем систему координат, в которой плоскость $O\xi\eta$ совпадает с невозмущенной поверхностью жидкости, начало координат O движется с постоянной скоростью v , направление оси $O\xi$ совпадает с направлением этой скорости, ось $O\zeta$ направлена вертикально вниз (первая подвижная система координат [2]). В соответствии с [1, 2] запишем:

$$(J_y + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi} + v_{55} \cdot \dot{\psi} + D \cdot H \cdot \psi = -r_w \cdot [\sigma_k \cdot b'_1 \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) + (\gamma \cdot b_1 - \sigma_k^2 \cdot b_1^n) \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)] \quad (1)$$

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{33} \right) \cdot \ddot{\zeta}_g + v_{33} \cdot \dot{\zeta}_g + \gamma \cdot S \cdot \zeta_g - v \cdot \lambda_{33} \cdot \dot{\psi} - v \cdot v_{33} \cdot \psi = r_w \cdot [(\gamma \cdot a_0 - \sigma_k^2 \cdot a_0^n) \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) - \sigma_k \cdot a'_0 \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)] \quad (2)$$

где D – водоизмещение судна;

ζ_g – аппликата центра тяжести судна относительно первой подвижной системы координат;

ψ – угол дифферента судна;

J_y – момент инерции массы судна относительно центра тяжести судна;

g – ускорение силы тяжести;

γ – удельный вес воды;

λ_{33} – суммарная присоединенная масса для судна при вертикальной качке;

v_{33} – суммарный коэффициент сопротивления для судна при вертикальной качке;

λ_{55} – суммарная присоединенная масса (присоединенный момент инерции) при килевой качке;

v_{55} – суммарный коэффициент сопротивления для судна при килевой качке;

S – площадь ватерлинии судна;

H – продольная метацентрическая высота;

a_0, b_1 – коэффициенты главной части возмущающих сил, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

a_0^n, b_1^n – коэффициенты для дифракционных компонентов возмущающих сил инерционной природы, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

a'_0, b'_1 – коэффициенты для демпфирующих дифракционных компонентов возмущающих сил, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

v – скорость судна;

σ_k – кажущаяся частота волны;

r_w – радиус орбиты на свободной поверхности воды.

Эти уравнения позволяют описывать качку судна при малых углах дифферента ψ , когда восстанавливающий момент линейно зависит от ψ . В случае захвата волной носовой оконечности последняя находится под водой и дальнейшее увеличение угла дифферента будет вести к резкому падению скорости роста восстанавливающего момента с увеличением ψ .

Кроме того, резко падает и момент инерции ватерлинии относительно поперечной оси. В этом случае гидродинамическое давление будет стремиться еще сильнее увеличить угол дифферента.

Величину гидродинамического давления P_N на носовую оконечность будем определять из условия движения частиц воды в волне по окружности с использованием подхода, представленного в [3, 4, 7].

Для оценки гидродинамических воздействий на корпус судна во время качки при погружении носовой оконечности в воду палуба в первом приближении может рассматриваться как крыло конечного удлинения. В результате обтекания возникает гидродинамическая сила P_R , которая

может быть разложена на перпендикулярную к палубе составляющую P_N , а также касательную к палубе P_T (рис. 1, где ψ – угол дифферента судна; β – угол наклона результирующей скорости обтекания палубы по отношению к вертикали).

Горизонтальная составляющая скорости обтекания палубы V_H определяется выражением

$$V_H = v + V_{WH}, \quad (3)$$

где v – скорость движения судна;

V_{WH} – горизонтальная скорость движения волны.

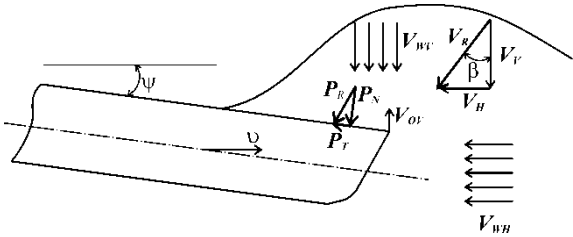


Рис. 1. Схема обтекания носовой части корпуса судна

Скорость обтекания палубы в вертикальном направлении V_V складывается из двух составляющих

$$V_V = V_{WV} + V_{OV}, \quad (4)$$

где V_{WV} – вертикальная скорость частиц воды;

V_{OV} – вертикальная скорость носовой оконечности, обусловленная качкой судна.

Абсолютное значение результирующей скорости обтекания палубы определится из выражения

$$V_R = \sqrt{V_H^2 + V_V^2}. \quad (5)$$

Для приближенной оценки значений P_N и P_T можно воспользоваться формулами для крыла бесконечного удлинения с некоторыми поправками:

$$P_N \cong \frac{1}{2} c_N \rho V_R^2 F, \quad (6)$$

где V_R – результирующая скорость обтекания палубы;

F – погруженная площадь палубы;

ρ – плотность воды;

c_N – коэффициент нормальной силы крыла,

зависящий в числе прочего от угла атаки, формы носовой оконечности в плане, телесности носовой оконечности, наличия надпалубных конструкций, характера обтекания палубы вблизи раздела двух сред и т.д.

Считая углы дифферента малыми, можем принять, что синус и тангенс угла дифферента равны самому углу, а косинус угла дифферента приближается к единице. В этом случае с учетом направления осей координат, принятых на рис. 2, можно записать

$$V_{OV} = -\dot{\zeta}_g - \dot{\psi} \cdot \xi_F, \quad (7)$$

где ξ_F – координата центра тяжести погруженной площади палубы, отсчитываемая от миделя.

Принятая на рис. 2 система координат $O\xi\eta\zeta$ совпадает с упомянутой выше первой подвижной системой координат [2].

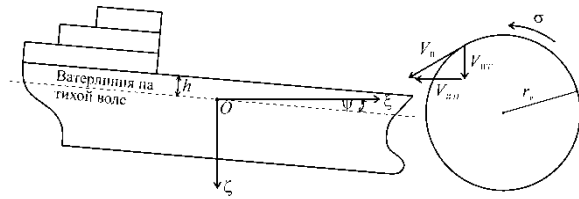


Рис. 2. Схема движения частиц воды в волне

В соответствии с рис. 2 значения скоростей частиц волны в зависимости от ее фазы могут быть записаны в виде [9]

$$V_{WV} = \sigma \cdot r_w \cdot \sin\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right); \quad (8)$$

$$V_{WH} = -\sigma \cdot r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right), \quad (9)$$

где $\xi_w = L/2 - a$ – координата, отсчитываемая от миделя, начиная с которой палуба погружена в воду;

σ_k – кажущаяся частота волны;

σ – частота волны;

r_w – радиус орбиты на свободной поверхности воды.

Значение ξ_w может быть определено из условия нахождения текущего уровня воды на уровне высоты надводного борта с учетом вертикальной и килевой качки судна

$$h - \zeta_g - \psi \cdot \xi_w + r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) = 0, \quad (10)$$

где h – высота надводного борта.

Подставляя (7) и (8) в (4), а (9) в (3) с учетом (5) получим

$$V_R = \left\{ \left[v - \sigma \cdot r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) \right]^2 + \left[\sigma \cdot r_w \cdot \sin\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) - \dot{\zeta}_g - \dot{\psi} \cdot \xi_F \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Теперь нормальная составляющая гидродинамической силы, действующей на носовую оконечность при ее обтекании, может быть оценена с использованием формулы (6). В первом приближении можно принять, что указанная гидродинамическая сила приложена в центре тяжести погруженной площади палубы ξ_F , и при больших значениях коэффициента полноты ватерлинии, проведенной на уровне верхней палубы, в соответствии с [3, 4, 7] дифференцирующий момент может быть определен из выражения

$$M_{оиф} = P_N \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2}\right) = P_N \cdot \xi_F. \quad (12)$$

Можно считать, что найденная гидродинамическая сила влияет главным образом

на килевую качку судна и практически не сказывается на его вертикальной качке. При этом влияние гидродинамической силы на килевую качку судна может быть учтено за счет уменьшения восстанавливающего момента на величину дифференцирующего момента при зарывании судна носом в волну.

Помимо этого, уменьшение восстанавливающего момента происходит и за счет потери площади ватерлинии и ее момента относительно поперечной оси. Эту величину можно оценить из выражения

$$\Delta I = I_F + F \cdot \xi_F^2 \cdot \frac{S}{S - F}, \quad (13)$$

где F – погруженная в воду площадь палубы, вычисляемая с использованием теоретического чертежа;

S – площадь ватерлинии судна (при отсутствии заливания носовой оконечности);

ξ_F – координата центра тяжести погруженной площади палубы, отсчитываемая от миделя;

I_F – собственный момент инерции погруженной в воду площади палубы относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости.

В соответствии с [2] можно принять, что продольный метацентрический радиус приближенно равен продольной метацентрической высоте, т.е. $R \approx H$, поэтому

$$\begin{aligned} DH_w &\approx \gamma \cdot (I_y - \Delta I) = \gamma \cdot \left(I_y - I_F - F \cdot \xi_F^2 \cdot \frac{S}{S - F} \right) \approx \\ &\approx DH - \gamma \cdot \left(I_F + F \cdot \xi_F^2 \cdot \frac{S}{S - F} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где H_w – откорректированная продольная метацентрическая высота, определяемая с учетом потери площади ватерлинии при погружении носовой оконечности в волну.

Входящие в выражение (14) величины I_F и ξ_F могут быть рассчитаны на основании данных теоретического чертежа для любой длины погруженного в воду участка палубы, который определяется в соответствии с (10)

Подставляя (6) в (12), а полученное выражение в (1), получаем уравнение килевой качки с учетом (14) в следующей форме:

$$\begin{aligned} (J_y + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi} + v_{55} \cdot \dot{\psi} + D \cdot H \cdot \psi - \\ - \gamma \cdot \left(I_F + F \cdot \xi_F^2 \cdot \frac{S}{S - F} \right) \cdot \psi - \end{aligned} \quad (15)$$

$$- \frac{1}{2} c_N \cdot \Gamma(F, \zeta) \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot F \cdot \xi_F =$$

$$= -r_w \cdot [\sigma_k \cdot b_1' \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) + (\gamma \cdot b_1 - \sigma_k^2 \cdot b_1'') \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)],$$

где $\Gamma(F, \zeta)$ – функция, учитывающая влияние свободной поверхности воды на гидродинамическое давление.

Функция $\Gamma(F, \zeta)$ изменяется от единицы при обтекании палубы на большой глубине до нуля, когда высота водного столба над палубой равна нулю. Снижение давления обусловлено деформированием границы раздела сред при вертикальном движении палубы. Анализ расчетов показал, что максимум давления генерируется на

палубе при дифференте судна на нос и прохождении вершины волны в районе носовой оконечности, т.е. когда высота водного столба над палубой достаточно большая, поэтому функция $\Gamma(F, \zeta)$ будет близка к единице. Однако по мере выхода палубы из воды высота водного столба будет резко уменьшаться, что деформирует свободную поверхность воды и приведет к некоторому снижению давления. Это несколько изменит правый край эпюры давлений, приведенной на рис. 4, без изменения экстремального давления. Поэтому в первом приближении можно считать, что функция $\Gamma(F, \zeta)$ равна единице.

Уравнение (15) является нелинейными по восстанавливающему моменту. Оно отличается от ранее применявшегося в [6] и [8] нелинейного модифицированного уравнения Дуффинга. Последнее использовалось в [8] для описания бортовой качки поврежденного судна на нерегулярном волнении, а в [6] было предложено применять его для описания динамики судна в бортовой интеллектуальной системе обеспечения безопасности мореплавания для контроля чрезвычайной ситуации, связанной с захватом носовой оконечности судна волной. Уравнение (15) совместно с уравнением (2) позволяет описать механизм взаимодействия судна с волной при погружении носовой оконечности в воду.

2. Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета продольной качки судна на регулярном волнении по уравнениям (2) и (15) и значения гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность, представлены на рис. 3 и рис. 4.

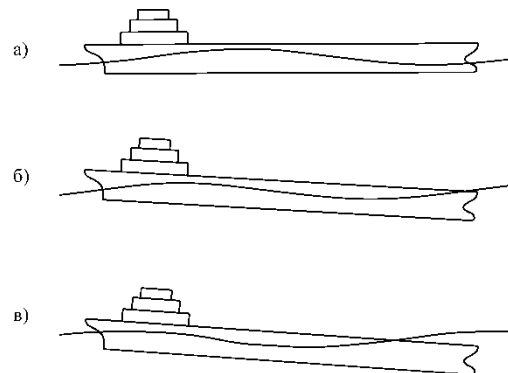


Рис. 3. Результаты моделирования движения судна на волнении

Расчет выполнялся для судна длиной 110 м, идущего вразрез волне, скорость судна варьировалась. При этом принимались следующие значения характеристик судна: $L = 110$ м, $B = 15,5$ м, $T = 5,64$ м, $S = 1260$ м², $J_y = 331000$ т·м·с², $R = 172$ м, $D = 5100$ т, $I_x = 18400$ м⁴, $I_y = 849200$ м⁴, $x_f = -4,52$ м.

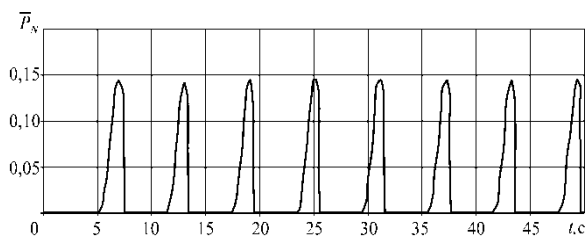


Рис. 4. Экстремальные значения гидродинамической силы, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее обтекании при погружении в волну

Величины расчетных гидродинамических давлений на палубу в носовой оконечности представлены на рис. 4. Видно, что величины экстремальных давлений имеют порядок $\bar{P}_N \approx 0,14$. Сравним эти значения гидродинамического давления с критическими значениями нагрузки на носовую оконечность, ведущими к перевороту судна, которые представлены в [5] для модели БМРТ «Пулковский Меридиан» и составляют $P_{крит} = 0,135$.

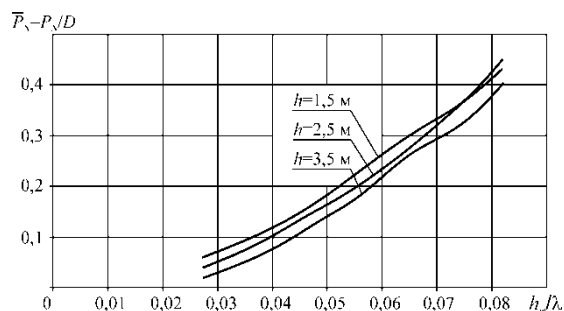


Рис. 5. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности при захвате волной от высоты волны

Можно сделать вывод, что величины гидродинамического давления, полученные по настоящей методике, оказываются на уровне, при котором суда могут быть опрокинуты. Предложенный упрощенный анализ расчета гидродинамических нагрузок на регулярном волнении показывает, что их величина может варьироваться в довольно широких пределах $\bar{P}_N = 0,05 \div 0,4$ в зависимости от высоты надводного борта h , высоты волны h_w , а также скорости хода судна v (рис. 5–7).

Так, при увеличении высоты волны экстремальные значения давлений на палубу в носовой оконечности судна растут (рис. 5), а с увеличением высоты надводного борта – падают (рис. 6). Увеличение скорости хода судна с $Fr = 0,03$ до $Fr = 0,22$ приводит к возрастанию давления на палубу примерно с $\bar{P}_N = 0,16$ до $\bar{P}_N = 0,27$ (рис. 7).

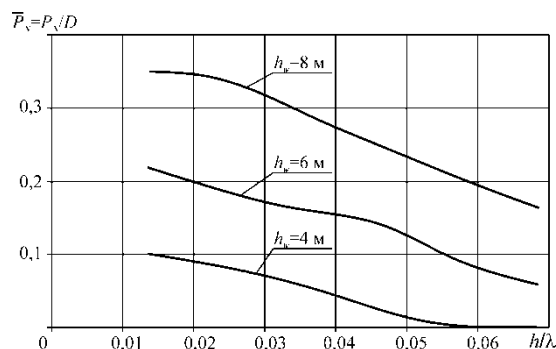


Рис. 6. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности при захвате волной от высоты надводного борта

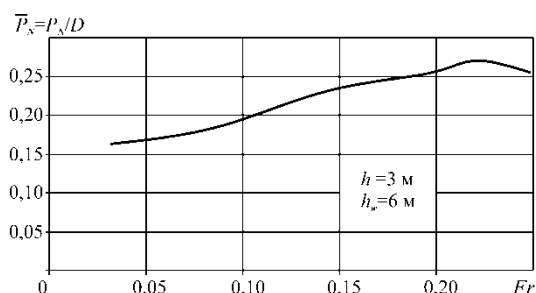


Рис. 7. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности при захвате волной от скорости хода

3. Экспериментальное исследование устойчивости судов в условиях захвата волной носовой оконечности

Для экспериментального исследования устойчивости судна на встречном волнении были проведены испытания самоходной модели в опытовом бассейне научно-исследовательского центра судостроения КГТУ.

Целью экспериментального исследования являлась проверка возможности реализации эффекта создания гидродинамического давления на палубе в носовой оконечности, приводящего к опрокидыванию судна.

Для проведения эксперимента была изготовлена базовая самоходная модель в масштабе 1:100 по чертежу реального танкера длиной 168 метров с тем лишь отличием, что палуба в носовой оконечности была принята плоской на уровне высоты надводного борта на миделе. Для возможности вариации метацентрической высоты модели на ней была установлена специальная мачта с закрепленной на ней штангой (рис. 8). Перемещая по высоте мачты штангу, представляется возможным изменять метацентрическую высоту. Контроль метацентрической высоты осуществлялся по периоду качки модели судна (рис. 9).

Перед началом испытаний модель находилась на исходной позиции в конце бассейна. Затем задавался выбранный режим регулярного волнения, который контролировался датчиком-волнографом. После того, как режим волнения устанавливался, начиналось движение самоходной модели на встречном волнении. Главное условие, которое необходимо достичь в процессе испытаний, это процесс заливания волной носовой оконечности

модели судна. Поведение модели на волнении фиксировалось видеосъемкой (рис. 10).

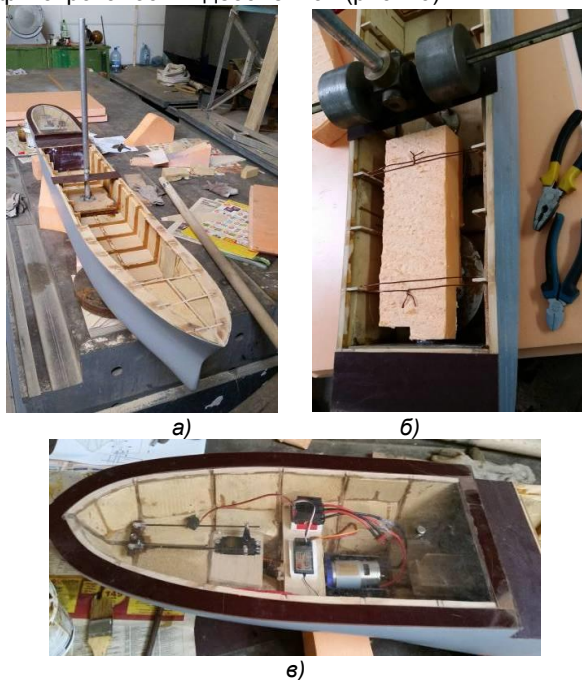


Рис. 8. Подготовка модели к испытаниям: а) – установка мачты; б) – укладка балласта; в) – монтаж двигателя

Из рис. 10 видно, как развивается аварийная ситуация при залипании водой носовой оконечности судна при высоте волны $h_w = \frac{L}{20} = 0,08$ м, где L – длина модели судна. Испытания, показанные на рис. 10, проводились на модели в полном грузу, когда высота надводного борта минимальна.



Рис. 9. Модель перед испытаниями

Удар волны по палубе в носовой оконечности судна с ее последующим обтеканием потоком жидкости создает гидродинамическое давление, равнодействующая которого смещена от

диаметральной плоскости судна, что вызывает появление кренящего момента, приводящего к возникновению определенного угла крена. Угол крена постепенно увеличивается, приводя в итоге к опрокидыванию модели судна.

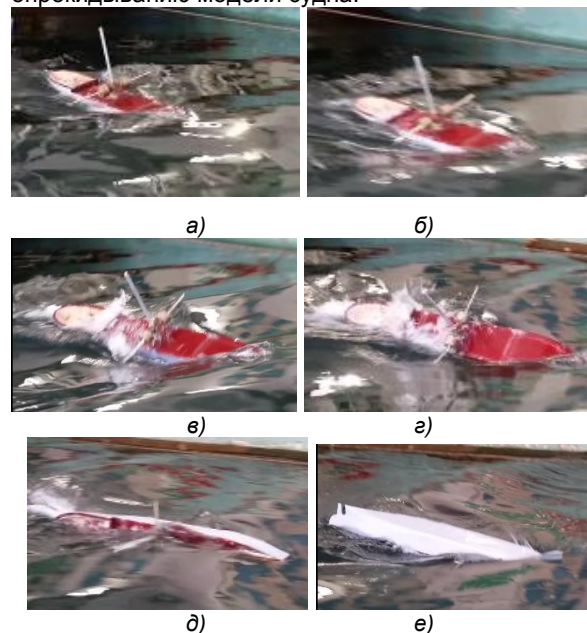


Рис. 10. Этапы развития аварийной ситуации, связанной с опрокидывание модели судна на встречном волнении при залипании носовой оконечности

Следует иметь в виду, что при возникновении гидродинамического импульса метацентрическая высота падает почти до нулевых значений. При этом период бортовых колебаний возрастает, а так как действие импульса давления ограничено по времени, то судно может не опрокинуться под воздействием одного импульса давления (при этом давление должно быть слишком большим).

В этих условиях, когда модель не возвращается в первоначальное положение после воздействия импульса, процесс нарастания крена будет являться результатом воздействия нескольких гидродинамических импульсов на палубу в носовой оконечности.

В процессе эксперимента зафиксировано явление потери остойчивости за счет постоянного увеличения угла крена судна вследствие воздействия на носовую оконечность серии гидродинамических импульсов при ее многократном погружении в воду. Это возможно в том случае, когда крен судна после воздействия первого гидродинамического удара не устраняется полностью, тогда последующий гидродинамический удар приводит к увеличению остаточного угла крена на еще больший угол, причем процесс продолжается до тех пор, пока увеличение угла крена не приведет к опрокидыванию судна. Таким образом, это возможно в случае, если за четверть периода бортовой качки к носу судна подходит следующая волна и вызывает обтекание носовой оконечности, т.е. если выполняется условие

$$\frac{\tau}{4} > \frac{L_c}{v+c}, \tag{16}$$

где τ – период бортовой качки судна;
 L_c – длина судна;
 v – скорость судна;
 c – скорость бега волны.

Заключение

Результаты математического моделирования движения судна на развитом встречном волнении показывают, что диапазон давлений, генерируемых при захвате волной носовой оконечности судна, изменяется в достаточно широких пределах, что создает реальную опасность гибели практически любых судов, имеющих плоские участки палуб в носовой оконечности. Предварительные результаты экспериментальных исследований поведения модели на волнении в опытовом бассейне подтвердили возникновение гидродинамических нагрузок при движении судна на развитом

встречном волнении с заливанием носовой оконечности, с последующей потерей остойчивости судна. Снизить вероятность гибели судов возможно как путем разработки эффективных успокоителей продольной качки, позволяющих ограничить глубину «зарывания» носовой оконечности судна в воду, так и ограничений гидродинамической силы за счет изменения архитектуры судов в носовой оконечности.

Благодарности. Авторы благодарят Научно-исследовательский центр судостроения ФГБОУ ВО «КГТУ» и лично Д.В. Злыгостева, Е.А. Чуреева и А.А. Сивогракова за предоставление экспериментальной базы и помощь в проведении испытаний, а также Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКР АААА-А18-118040590116-0).

Литература

1. Благовещенский, С.Н. Качка корабля / С.Н. Благовещенский. Л.: Судпромгиз, 1954. 520 с.
2. Благовещенский, С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В 2 т. Т. 2. Динамика (качка) корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодили. Л.: Судостроение, 1976. 176 с.
3. Бураковский, Е.П. Некоторые проблемы обеспечения общей прочности судов в чрезвычайных ситуациях / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 82(366). С. 21-30.
4. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. СПб.: Лань, 2017. 404 с.
5. Бураковский, Е.П. К вопросу о сценарии гибели судов во время шторма вследствие захвата волной их носовой оконечности / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №4(38). Т. 2. С.27-33.
6. Бураковский, П.Е. Построение алгоритма контроля ситуации захвата волной носовой оконечности судна методами современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Известия КГТУ. Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. № 37. С. 178-185.
7. Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных решений, направленных на предотвращение захвата волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». 2017. №2. С.7-14.
8. Нечаев, Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений / Ю.И. Нечаев. СПб.: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
9. Шулейкин, В.В. Физика моря / В.В. Шулейкин. М.: Наука, 1968. 1080 с.

References

1. Blagoveshchenskiy S.N. Kachka korablya (The rolling of the ship). Leningrad, Sudpromgiz, 1954. 520 p.
2. Blagoveshchenskiy S.N., Kholodilin A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. V 2 tomakh. Tom. 2. Dinamika (kachka) korablya (A guide to the statics and dynamics of the ship. In 2 volumes. Volume 2. Dynamics (rolling) of the ship). Leningrad, Sudostroyeniye, 1976. 176 p.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2014). Nekotorye problemy obespecheniya obshchey prochnosti sudov v chrezvychaynykh situatsiyakh (Some problems of ensuring the general strength of ships in emergency situations). Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, issue 82(366), pp. 21–30.
4. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. Jekspluatatsionnaya prochnost' sudov (Operational strength of vessels). Saint Petersburg, Lan', 2017. 404 p.
5. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E. (2017). K voprosu o stsenarii gibeli sudov vo vremya shtorma vsledstvie zakhvata vol-noy ikh nosovoy okonechnosti (More on the wreck of ship scenarios during a storm due to the seizure by the wave of their fore end). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(38), vol.2, pp.27–33.
6. Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I. (2015). Postroyeniye algoritma kontrolya situatsii zakhvata volnoy nosovoy okonechnosti sudna metodami sovremennoy teorii katastrof (The construction of an algorithm for controlling the situation of wave capture by the bow of the vessel by the methods of modern catastrophe theory). Izvestiya KGTU, №37, pp.178–185.
7. Burakovskiy P.E. (2017). Razrabotka konstruktivnykh resheniy, napravlennykh na predotvrashhenie zahvata volnoy nosovoy okonechnosti sudna (Development of constructive solutions aimed at preventing the seizure by the wave of the bow of the ship). Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: marine engineering and technologies, №2, pp.7–14.
8. Nechaev Yu.I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy (Catastrophe theory: a modern approach when making decisions). Saint Petersburg, Art-Ekspress, 2011. 392 p.
9. Shuleykin V.V. Fizika morya (Physics of the sea). Moscow, Nauka, 1968. 1080 p.

УДК 629.5.015.4

УЧЕТ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ БАЛОК СУДОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ В ЗАПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Евгений Петрович Бураковский

доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Павел Евгеньевич Бураковский

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Артем Владимирович Мысник

аспирант кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: artem9306@gmail.com

Аннотация

В настоящей работе представлена методика расчета балок судовых перекрытий в запредельном состоянии, позволяющая учитывать упругие свойства звеньев образующегося кинематически изменяемого механизма. При этом учитываются силы поддержания, действующие на деформируемую балку со стороны наружной обшивки. Расчет сводится к рассмотрению локально нагруженной упруго-пластической балки, работающей в условиях сложного изгиба и лежащей на многослойном упруго-пластическом основании. Параметры жесткости данного основания изменяются при достижении его прогибами пороговых величин и определяются путем построения и аппроксимации зависимости сила – прогиб балки-полоски обшивки. После образования кинематически изменяемого механизма дальнейшее нагружение балки сопровождается движением внешнего нестационарного пластического шарнира к месту нагружения и трансформацией зоны обрушения. Выполнено сопоставление результатов расчета с использованием предложенной методики и упрощенных решений, в которых звено обрушения балок набора судовых корпусов при исследовании их поведения в запредельном состоянии звенья кинематически изменяемого механизма могут приниматься абсолютно жесткими.

Ключевые слова: бортовое перекрытие, локальные нагрузки, пластический шарнир, запредельное состояние, дифференциальное уравнение, упруго-пластическое основание, шпангоут, наружная обшивка.

ON THE ACCOUNT OF ELASTIC BEHAVIOUR OF THE CONSTRUCTION UNDER DEFORMATION OF SHIPBOARD BEAMS IN OFF-THE-LIMIT CONDITION

Evgeniy P. Burakovskiy

DSc in Engineering, Professor at the Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Navigation Safety
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: paul_b@mail.ru

Artem V. Mysnik

Postgraduate Student at the Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: artem9306@gmail.com

Abstract

This paper presents a method for calculating shipboard beams in the off-the-limit condition, allowing us to take into account the elastic properties of the links of the resulting kinematically variable mechanism. This takes into account the supporting forces acting on the deformed beam from the outer plate. The calculation is reduced to consideration of a locally loaded elastic-plastic beam, operating in complex bending and lying on a multilayer elastic-plastic base. The stiffness parameters of this base change when its deflections reach threshold values and are determined by constructing and approximating the dependence "force — deflection of the shipboard beam". After the kinematically variable mechanism is formed, the further loading of the beam is accompanied by the movement of an external non-stationary plastic hinge to the loading place, and transformation of the collapse zone. A comparison was made of the calculation results using the proposed methodology and simplified solutions, in which the link was taken absolutely rigid. It is shown that in the case of implementation of the flexural mechanism of the collapse of the shipboard beams in the study of their behavior in the off-the-limit condition, the links of the kinematically variable mechanism can be made absolutely rigid.

Key words: shipboard, local loads, plastic hinge, off-the-limit condition, differential equation, elastic-plastic base, rib, outer plate.

Введение

Главной причиной повреждений бортовых перекрытий судов является действие интенсивных локально распределенных нагрузок. Поэтому для объективной оценки технического состояния корпусов судов, разработки эффективных схем подкрепления и оптимизации весовых характеристик корпусных конструкций необходимо располагать методами расчета корпусных конструкций за пределом упругости. В рамках гипотезы «о мгновенном раскрытии пластических шарниров» были разработаны методики расчета балок судовых корпусов в упруго-пластической стадии, в том числе в запредельном состоянии [3, 4, 7, 8]. При этом до образования кинематически изменяемого механизма расчет сводится к рассмотрению локально загруженной упруго-пластической балки, лежащей на многослойном упруго-пластическом основании, роль которого выполняет бортовая обшивка. После образования кинематически изменяемого механизма дальнейшее нагружение конструкции сопровождается движением внешнего нестационарного пластического шарнира к месту нагружения, а звенья кинематически изменяемого механизма считаются абсолютно жесткими [7, 8]. В этом случае реакции на обрушившиеся звенья шпангоута реакции со стороны упруго-пластического основания, роль которого выполняет бортовая обшивка, изменяются по длине звена по линейному закону. Однако в действительности звенья шпангоута несколько изгибаются под действием внешней нагрузки и реакций упруго-пластического основания, вследствие чего силы поддержания будут изменяться по длине звена по закону, отличному от линейного. Для оценки влияния данного эффекта на поведение локально нагруженных балок судовых корпусов в запредельном состоянии в настоящей работе выполнено исследование деформирования шпангоута под действием сосредоточенной силы после образования кинематически изменяемого механизма с учетом упругих свойств балки.

1. Методы исследования

В отличие от [7, 8] для описания деформирования шпангоута в запредельном состоянии воспользуемся дифференциальным уравнением балки, лежащей на упругом основании, и работающей в условиях сложного изгиба [9]:

$$EI \cdot w''''(x) - T \cdot w''(x) + k \cdot w(x) = q(x), \quad (1)$$

где EI – жесткость балки по отношению к изгибу;

$w(x)$ – упругая линия балки;

T – продольная сила;

k – коэффициент жесткости упругого основания;

$q(x)$ – интенсивность внешней распределенной нагрузки, действующей на балку.

Решение данного уравнения имеет вид [9]

$$\begin{aligned} w(x) = & C_1 \operatorname{ch}(\delta \cdot x) \cdot \cos(\gamma \cdot x) + \\ & + C_2 \operatorname{ch}(\delta \cdot x) \cdot \sin(\gamma \cdot x) + \\ & + C_3 \operatorname{sh}(\delta \cdot x) \cdot \cos(\gamma \cdot x) + \\ & + C_4 \operatorname{sh}(\delta \cdot x) \cdot \sin(\gamma \cdot x) + \frac{q(x)}{k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\delta = \alpha \sqrt{1 + \beta}; \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha \sqrt{1 - \beta}; \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot E \cdot I}}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{T}{2\sqrt{E \cdot I \cdot k}}. \quad (6)$$

2. Методика расчета локально нагруженного шпангоута

Для балки, лежащей на упруго-пластическом основании с линейным упрочнением, после образования кинематически изменяемого механизма возможны три варианта деформирования в зависимости от прогибов звена: все звено лежит на основании с жесткостью k_1 , звено лежит одновременно на основаниях с жесткостью k_1 и k_2 , все звено находится на основании с жесткостью k_2 . Рассмотрим первый случай (рис. 1,а), граничные условия для которого имеют вид

$$w''(0) = -\frac{M_1(T)}{EI}; \quad (7)$$

$$w'''(0) = \frac{P}{2EI} + \frac{T}{EI} \cdot w'(0); \quad (8)$$

$$w''(l) = \frac{M_2(T)}{EI}; \quad (9)$$

$$w'''(l) = 0, \quad (10)$$

где P – внешняя нагрузка, действующая на шпангоут;

$M_1(T)$ – предельный момент сечения шпангоута при сжатом присоединенном пояске (центральный пластический шарнир);

$M_2(T)$ – предельный момент сечения шпангоута при растянутом присоединенном пояске (внешний нестационарный пластический шарнир).

Значения моментов $M_1(T)$, $M_2(T)$ определяются в соответствии с [1, 2] в зависимости от профиля балки шпангоута, а продольная сила T может быть найдена из уравнения совместности деформаций [7, 8]:

$$T = \frac{E \cdot F \cdot K_{ршп}}{l} \cdot \left[\frac{1}{2} \int_0^l [w'(x)]^2 dx - \sum_i \theta_i \frac{\partial M_i(T)}{\partial T} \right], \quad (11)$$

где E – модуль Юнга;

F – площадь сечения профиля шпангоута;

$K_{ршп}$ – коэффициент распора шпангоута;

$w(x)$ – упругая линия шпангоута;

l – длина звена шпангоута;

θ_i – угол слома в i -м пластическом шарнире;

$M_i(T)$ – предельный момент сечения для i -го пластического шарнира.

Коэффициент распора шпангоута определяется в соответствии с [3, 7, 8]

$$K_{ршп} = \frac{0,08 + 0,6 \frac{2 \cdot l}{a}}{1,08 + 0,6 \frac{2 \cdot l}{a}}, \quad (12)$$

где a – шпация перекрытия.

После определения постоянных интегрирования, входящих в (2), в соответствии с граничными условиями (7)-(10) внешняя нагрузка, действующая на балку, увеличивается на величину ΔP и определяется новое положение внешнего нестационарного пластического шарнира. При этом изменяется коэффициент распора балки и продольная сила согласно выражениям (11) и (12). Процесс повторяется до тех пор, пока часть звена не перейдет на основание с жесткостью k_2 (рис. 1,б), либо пока продольная сила не достигнет предельного значения $T_0 = \sigma_T \cdot F$, где σ_T – предел текучести материала балки. В последнем случае балка превращается в гибкую нить, лежащую на упруго-пластическом основании с переменными характеристиками жесткости.

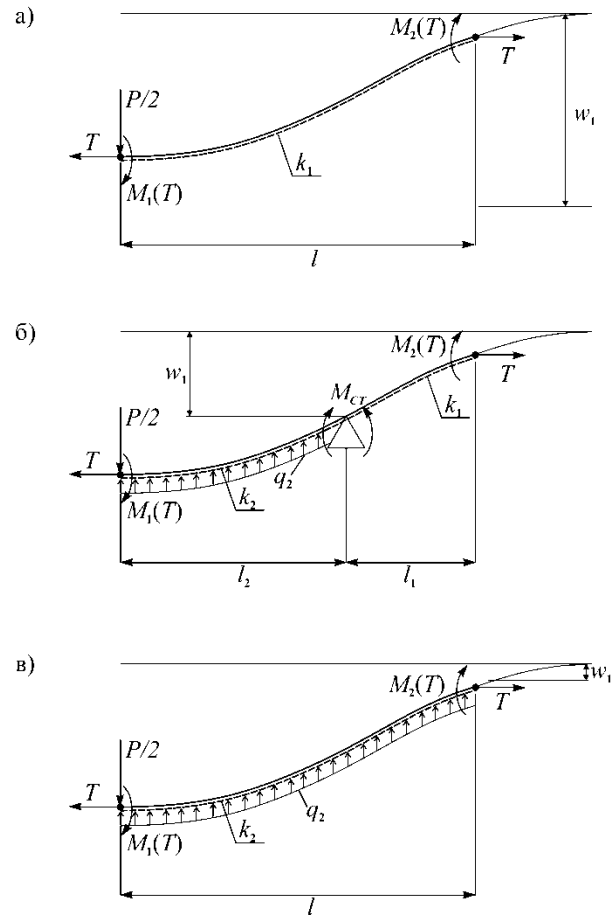


Рис. 1. Расчетные схемы шпангоута в предельном состоянии

Если звено одновременно лежит на основаниях с жесткостью k_1 и k_2 (рис. 1,б), то его следует разделить на два участка, каждый из которых находится на основании с одной жесткостью. Установим на границе участков фиктивную опору и будем считать, что деформирование участков балки, лежащих на основаниях жесткость k_1 и k_2 , описываются упругими линиями $w_1(x)$ и $w_2(x)$ соответственно. При этом начало координат для каждого из участков балки примем на их левом конце, прогибы $w_1(x)$ будем отсчитывать от недеформированного состояния шпангоута, а прогибы $w_2(x)$ от порогового значения w_1 , при котором происходит смена жесткости упруго-пластического основания шпангоута. Запишем граничные условия для каждого из участков балки:

$$w_2''(0) = -\frac{M_1(T)}{EI}; \quad (13)$$

$$w_2'''(0) = \frac{P}{2EI} + \frac{T}{EI} \cdot w_1'(0); \quad (14)$$

$$w_2''(l_2) = \frac{M_{CT}}{EI}; \quad (15)$$

$$w_2(l_2) = 0; \quad (16)$$

$$w_1''(0) = \frac{M_{CT}}{EI}; \quad (17)$$

$$w_1(0) = w_1; \quad (18)$$

$$w_1'(l_1) = \frac{M_2(T)}{EI}; \quad (19)$$

$$w_1''(l_1) = 0, \quad (20)$$

где M_{CT} – изгибающий момент, действующий на фиктивной опоре, установленной в месте изменения жесткости упруго-пластического основания с k_1 на k_2 .

Значение изгибающего момента M_{CT} может быть найдено из условия равенства углов поворота сечений балки слева и справа от фиктивной опоры, в районе которой происходит смена жесткости основания, т.е.

$$w_2'(l_2) = w_1'(0). \quad (21)$$

В том случае, если все звено лежит на основании с жесткостью k_2 (рис. 1,в), граничные условия определяются выражениями (7)-(10). Но в отличие от варианта деформирования, представленного на рис. 1,а, все звено будет нагружено распределенной нагрузкой интенсивностью $q_2 = k_1 \cdot w_1$, направленной против действия внешней нагрузки P .

3. Результаты расчета

Результаты расчета по предложенной методике (кривая 1) представлены на рис. 2, где P_2 – нагрузка, приводящая к образованию в балке кинематически изменяемого механизма; f – прогиб балки в месте нагружения; a – шпация перекрытия. На рисунке также представлена зависимость сила – прогиб для той же балки набора, построенная с использованием допущения об абсолютной жесткости звеньев кинематически изменяемого механизма (кривая 2) [7, 8]. Расчет выполнялся для шпангоутов, изготовленных из несимметричного полособульба 18а, шпация бортового перекрытия принималась равной 600 мм, толщина обшивки $t = 13$ мм.

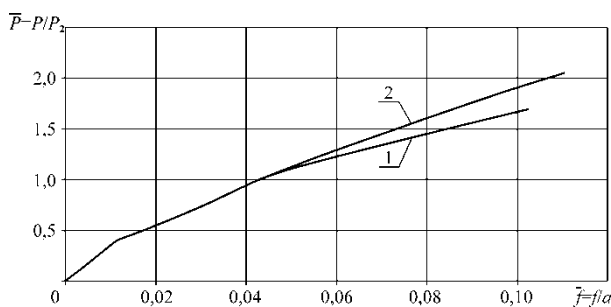


Рис. 2. Зависимости сила – прогиб для локально нагруженного шпангоута: 1– деформирование звена описывается дифференциальным уравнением; 2– жесткое звено

Видно, что в зоне больших прогибов наблюдается некоторое расхождение при расчете с использованием различных допущений. Следует заметить, что использование дифференциального уравнения (1) для описания деформирования балки набора в запредельном состоянии сопряжено с возникновением погрешности, увеличивающейся с ростом прогибов, т.к. в уравнение (1) не входят слагаемые, нелинейные относительно функции $w(x)$ и ее производных. Кроме того, использование расчетных методик [7, 8], в рамках которых обрушившиеся звенья балки набора считаются недеформируемыми, позволяет производить расчет по упрощенным формулам. Это позволяет ускорить процесс вычисления, что делает возможным использование методик [7, 8] при разработке бортовых интеллектуальных систем контроля прочности судов, когда требуется выполнять расчет конструкций корпуса для оценки и прогнозирования их технического состояния в режиме реального времени [5, 6].

Заключение

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что в случае реализации изгибного механизма обрушения балок набора судовых корпусов при исследовании их поведения в запредельном состоянии звенья кинематически изменяемого механизма в большинстве случаев могут приниматься абсолютно жесткими.

Литература

1. Апполонов, Е.М. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций / Е.М. Апполонов, О.В. Таровик. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2012. 128 с.
2. Беленький, Л.М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии / Л.М. Беленький. – Л.: Судостроение, 1983. 448 с.
3. Бураковский, П.Е. Учет жесткости обшивки при деформировании связей судовых бортовых перекрытий, воспринимающих интенсивные локальные нагрузки / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 41(325). С. 157-170.
4. Бураковский, П.Е. К вопросу о выборе жесткости промежуточного шпангоута / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 55(339). С. 57-62.
5. Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля прочности промысловых судов при посадке на мель, столкновении судов и входе в ледовое поле на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии. 2014. №3(25). С.99-104.
6. Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля эксплуатационной прочности промысловых судов при коррозии корпуса, швартовых операциях и восприятии многократных нагрузок на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии. 2014. №4(26). Т. 2. С. 24-31.

7. Бураковский, П.Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации: монография / П.Е. Бураковский. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. 298 с.
8. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. СПб.: Лань, 2017. 404 с.
9. Короткин, Я.И. Строительная механика корабля и теория упругости. В 2 т. Т. 1. Изгиб и устойчивость стержней и стержневых систем / Я.И. Короткин, В.А. Постнов, Н.Л. Сиверс. Л.: Судостроение, 1968. 424 с.

References

1. Appolonov E.M., Tarovik O.V. Predel'nyye nagruzki i uprugoplasticheskoye deformirovaniye sudovykh balochnykh konstruksiy (Limit loads and elastoplastic deformation of ship beam structures). Saint Petersburg, tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut imeni akademika A.N. Krylova, 2012. 128 p.
2. Belen'kiy L.M. Raschet sudovykh konstruksiy v plasticheskoy stadii (Calculation of ship structures in the plastic stage). Leningrad, Sudostroyeniye, 1983. 448 p.
3. Burakovskiy P.E. (2008). Uchet zhestkosti obshivki pri deformirovaniy svyazey sudovykh bortovykh perekrytiy, vosprinimayushchikh intensivnyye lokal'nyye nagruzki (Allowance for the rigidity of the skin when deforming the connections of shipboard floors overlapping the intense local loads). Trudy tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta imeni akademika A.N. Krylova, issue 41(325), pp. 157-170.
4. Burakovskiy P.E. (2010). K voprosu o vybore zhestkosti promezhutochnogo shpangouta (On the choice of stiffness of the intermediate frame). Trudy tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta imeni akademika A.N. Krylova, issue 55(339), pp. 57-62.
5. Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I. (2014). Prakticheskaya realizatsiya grafoanaliticheskoy sistemy kontrolya prochnosti promyslovykh sudov pri posadke na mel', stolknovenii sudov i vkhode v ledovoye pole na osnove sovre-mennoy teorii katastrof (Practical implementation of the graphoanalytical control system for the strength of fishing vessels during grounding, collision of vessels and entry into the ice field on the basis of modern catastrophe theory). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №3(25), pp. 99-104.
6. Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I. (2014). Prakticheskaya realizatsiya grafoanaliticheskoy sistemy kontrolya prochnosti promyslovykh sudov pri posadke na mel', stolknovenii sudov i vkhode v ledovoye pole na osnove sovremennoy teorii katastrof (Practical implementation of the grapho-analytical system for monitoring the operational strength of fishing vessels in case corrosion, mooring operations and the perception of multiple loads on the basis of modern catastrophe theory). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4(26), vol. 2, pp. 24-31.
7. Burakovskiy P.E. Obespecheniye prochnosti korpusnykh konstruksiy sudov v protsesse ekspluatatsii: monografiya (Ensuring the strength of ship hull structures in the process of operation: monograph). Kaliningrad, Izdatel'stvo BGARF, 2015. 298 p.
8. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. Jeksplyuatsionnaya prochnost' sudov (Operational strength of vessels). Saint Petersburg, Lan', 2017. 404 p.
9. Kороткин YA.I., Postnov V.A., Sivers N.L. Stroitel'naya mekhanika korablya i teoriya uprugosti. V 2 tomakh. Tom. 1. Izgib i ustoychivost' sterzhney i sterzhnevnykh sistem (Building mechanics of the ship and the theory of elasticity. In 2 volumes. Volume 1. Bending and stability of rods and rod systems). Leningrad, Sudostroyeniye, 1968. 424 p.

УДК 621.7:629.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Николай Леонидович Великанов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водных ресурсов и водопользования
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения и технических систем
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: monolit8@yandex.ru

Олег Васильевич Шарков

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории механизмов и машин и деталей машин
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1

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

Аннотация

При эксплуатации судов остаточные напряжения и пластические деформации могут вызывать изменение прочности, коррозионной стойкости, жесткости или точности сварных корпусных конструкций. В работе предложены математические модели для расчета остаточных сварочных напряжений, действующих в металлических листовых элементах судовых корпусных конструкций. Математические модели получены на основе решения краевой задачи теории упругости о равновесия вваренного элемента в однородной сплошной пластине. При решении системы дифференциальных уравнений использованы усредненные величины продольной и поперечной усадки сварного шва. Результаты решения краевой задачи равновесия хорошо согласуются с опытными данными по продольным остаточным напряжениям вдоль оси симметрии сварного шва. Обоснованное и грамотное применение методов определения и управления остаточными напряжениями позволяет, с одной стороны, экономно изготавливать сварные конструкции, с другой — существенно повысить их качество и надежность.

Ключевые слова: корпусные судовые конструкции, остаточные напряжения, сварка, металлические конструкции, комплексные потенциалы.

MODELING RESIDUAL WELDING VOLTAGES IN SHIP HULL STRUCTURES

Nikolay L. Velikanov

DSc in Engineering, Professor at the Department of Aquatic Resources and Water Management
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Machine Science and Technological Systems
I. Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: monolit8@yandex.ru

Oleg V. Sharkov

DSc in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Theories of Mechanisms and Machines and Machine Parts

Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

DSc in Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Machine Science and Technological Systems
I. Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: o_sharkov@mail.ru

Abstract

During the operation of vessels, residual stresses and plastic deformations can cause a change in strength, corrosion resistance, stiffness, or accuracy of welded hull structures. The paper proposes mathematical models for calculating the residual welding stresses acting in the metal sheet elements of ship hull structures. Mathematical models have been obtained on the basis of solving the elastic

boundary value problem on equilibrium of a welded element in a homogeneous continuous plate. In solving the system of differential equations, the averaged values of the longitudinal and transverse shrinkage of the weld joint have been used. The results of solving the boundary value equilibrium problem are in good agreement with experimental data on longitudinal residual stresses along the axis of symmetry of the weld joint. Reasonable and competent application of methods for determination and management of residual stresses allows, on the one hand, for economical production of welded structures, and on the other, for significant improvement in their quality and reliability.

Key words: ship hull structures, residual stresses, welding, metal structures, complex potentials.

Введение

Проблема определения остаточных сварочных напряжений в металлических корпусных конструкциях является актуальной как для судостроения, так и других отраслей промышленности. Например, при определении остаточных напряжений в переборках уплотнения в местах прохождения судового валопровода, крышках сварных кнехтов, усиления труб в местах их прохода через переборки и др.

Анализ литературных источников показал, что определению и исследованию остаточных сварочных напряжений посвящено значительное число работ [1–17]. В этих работах проведены исследования возникновения остаточных напряжений в зависимости от различных видов сварки [1–4], рассмотрены методики и инструменты для их оценки и прогнозирования [5–10], их влияние на общую прочность [11–13] и остаточный ресурс [14–15] конструкции и др.

Одним из наиболее удобных и универсальных является определение сварных напряжений на основе методов теории упругости и строительной механики корабля. Однако их достоверность зависит от правильности задания граничных условий, через которые выражаются комплексные потенциалы, что требует разработки расчетных схем и математических моделей для их определения.

1. Методика определения остаточных напряжений

1.1. Вводные замечания

В процессе ремонта корпуса судна часто выполняют заделку прямоугольных и круглых отверстий с использованием сварки.

При этом в конструкциях возникают дополнительные остаточные деформации и напряжения, которые накладываются на поле внешних напряжений от общего продольного изгиба корпуса судна и оказывают влияние в процессе эксплуатации на их прочность и работоспособность.

Решение задачи определения поля остаточных напряжений в судовых конструкциях можно найти суперпозицией задач определения напряжений от отдельных составляющих. К этим составляющим относятся: внешние нагрузки, действующие на конструкцию; предварительные напряжения до сварки; сварочные напряжения; разность температур отдельных частей конструкции и т.д.

Рассмотрим остаточные напряжения, возникающие в двух случаях: при выполнении прямолинейного сварного шва и сварного шва в виде окружности.

В настоящее время накоплен достаточный опыт проектных и технологических разработок по применению сварных соединений, обеспечивающий

их безопасную эксплуатацию в судовых конструкциях. Поэтому в данной работе рассматриваются остаточные напряжения вне самого шва. Положим, что в пластине при отсутствии шва создается однородное напряженное состояние.

1.2. Теоретические модели

В расчетной схеме (рис. 1) прямолинейный сварной шов представлен в виде элемента толщиной, равной толщине пластины, вставленного в нее с продольным $2\Delta_1$ и поперечным $2\Delta_2$ натягом.

Поле остаточных напряжений около сварного шва вызвано его продольными и поперечными усадками при остывании и определяется с использованием потенциалов Колосова – Мусхелишвили [18]:

$$\begin{cases} \varphi(z) = \frac{G}{\pi i(\chi + 1)} \int_L \left(\frac{g(t)}{t - z} \right) dt, \\ \psi(z) = -\frac{G}{\pi i(\chi + 1)} \int_L \left(\frac{\overline{g(t)} + \overline{t}g'(t)}{t - z} \right) dt, \end{cases} \quad (1)$$

где $z = x + iy$ – координата точки пластины; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; G – модуль сдвига материала пластины; $\chi = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ – упругая постоянная, связанная с коэффициентом Пуассона μ ; t – координата точки, расположенной на границе шва; $g(t)$ – скачок перемещений на границе сварного шва L .

Величины скачков перемещений на верхней и нижней границах сварного шва соответственно равны

$$g(t) = (\Delta_1 x / l) + i\Delta_2 \text{ и } \overline{g(t)} = (\Delta_1 x / l) - i\Delta_2. \quad (2)$$

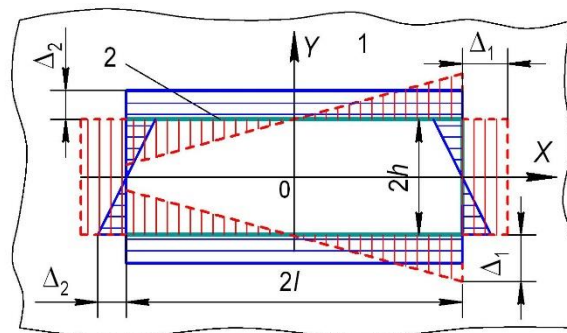


Рис. 1. Схема сварного шва: 1 – пластина, 2 – сварной шов

Значения переменной t на верхней и нижней границах шва соответственно равны $x + ih$ и $x - ih$, сопряженные значения скачка перемещений $\overline{g(t)} - (\Delta_1 x/l) - i\Delta_2$ и $(\Delta_1 x/l) + i\Delta_2$, комбинация $t g'(t) - \Delta_1(x - ih)/l$ и $\Delta_1(x + ih)/l$ [19].

Учитывая значения скачка перемещений, а также принимая $h \ll 1$, получим по формулам (1) и (2) следующие значения потенциалов:

$$\begin{cases} \varphi(z) = \frac{2G(\Delta_1 h - \Delta_2 l)}{\pi i(\chi + 1)} \ln \frac{l-z}{l+z}, \\ \psi(z) = \frac{-2G}{\pi i(\chi + 1)} \left[\frac{(3\Delta_1 h + \Delta_2 l) \ln \frac{l-z}{l+z}}{z^2 - l^2} + \frac{2lz(\Delta_1 h - \Delta_2 l)}{z^2 - l^2} \right]. \end{cases} \quad (3)$$

где l – половина длины сварного шва; h – половина толщины сварного шва.

Остаточные напряжения, выражающиеся через потенциалы (3) по формулам Колосова - Мусхелишвили.

Поле остаточных напряжений сварного шва в виде окружности можно определить, решив плоскую задачу теории упругости о напряженном состоянии пластины с круглым отверстием радиуса R , в которое установлена с заданным натягом $g(z)$ круглая плоская вставка (где z – переменная комплексной плоскости, совпадающей с пластиной).

В этом случае выражение для определения скачка перемещений для кругового шва можно получить путем комформного отображения прямолинейного шва (рис. 1) на единичную окружность в виде

$$g(\theta) = \Delta_1 \cos \theta + i\Delta_2 \sin \theta, \quad (4)$$

где θ – полярная координата точки контура единичного круга; Δ_1, Δ_2 – продольная и поперечная усадка сварного шва.

1.3. Алгоритм расчета

Усадки сварного шва Δ_1 и Δ_2 определяются расчетно-экспериментальным способом. Для этого берутся пластины, идентичные тем, что будут свариваться в рассчитываемой корпусной конструкции. На пластину наносится сварной шов. После его остывания методами тензометрии определяются остаточные сварочные напряжения в нескольких точках в районе шва.

Затем по значениям скачка перемещений (2) и комплексных потенциалов (3) (для прямолинейного шва) методами теории упругости [18] с использованием численных методов определяют нормальные и касательные напряжения.

Для шва, выполненного по окружности, скачек перемещений определяется выражением (4). Комплексные потенциалы для этого случая не выражаются в аналитическом виде, используются численные методы.

По полученным напряжениям путем решения обратной задачи теории упругости [18], определяются усадки сварного шва.

Затем переходят к расчету остаточных сварочных напряжений. Фиксируются геометрические параметры шва, физические характеристики материала. По значениям усадок, характеристикам пластин и шва проводится расчет полей остаточных сварочных напряжений.

2. Результаты расчета остаточных напряжений

По разработанной методике выполнены расчеты остаточных сварочных напряжений для прямолинейных и круговых швов, выполненных в конструкциях из алюминиевых сплавов и сталей.

На рис. 2 показано сравнение теоретических и экспериментальных величин остаточных сварочных напряжений σ_x в прямолинейном сварном шве для алюминиевого сплава толщиной 8 мм. Эпюры построены по оси симметрии сварного шва (координата $x=0$).

Теоретические результаты получены численными методами на основании предложенной методики расчета, а экспериментальные – методом тензометрии. Для большинства точек относительная погрешность между ними находится в диапазоне от 2,3 до 28,7 %.

Как видно из графиков остаточные напряжения постепенно уменьшаясь при переходе от оси шва к околошовной зоне, они затем резко спадают до нуля.

Похожие результаты получены и для конструкций из стали. Установлено, что максимальные остаточные напряжения σ_x в низкоуглеродистых сталях обычно близки к пределу текучести.

В зависимости от степени легирования металла шва напряжения в нем могут быть несколько выше или несколько ниже, чем в околошовной зоне.

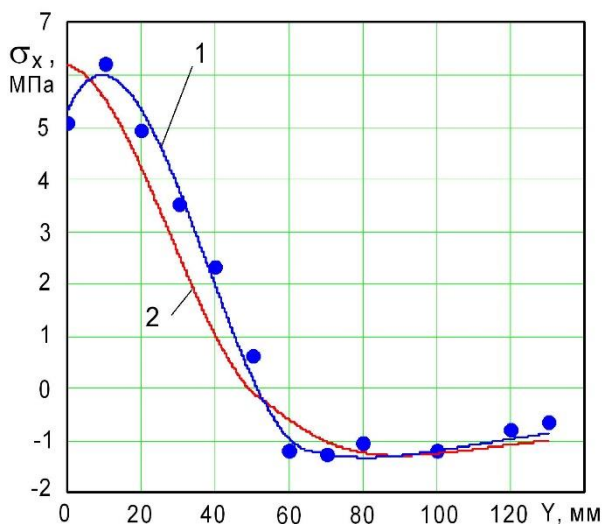


Рис. 2. Остаточные продольные напряжения при сварке алюминиевого сплава: 1 – экспериментальные результаты (точки – эксперимент, линия – сглаженная кривая); 2- теоретические результаты

Скорость охлаждения стали, а также ее исходное состояние оказывают влияние на величину предела

текучести после сварки, а следовательно, и на величину остаточных напряжений.

Заключение

Полученные выражения (2) и (4) позволяют определить величины скачка перемещений на границе прямолинейного и выполненного по окружности сварных швов. Зная скачек смещений, можно определить комплексные потенциалы и по ним, методами теории упругости нормальные и касательные напряжения.

Выполненные расчеты показали, что интенсивность остаточных сварных напряжений быстро убывает при удалении от сварного шва. В непосредственной близости от шва напряжения достигают предела текучести материала свариваемых пластин.

Точность расчета остаточных сварочных напряжений зависит от знания величин продольной и поперечной усадок сварного шва, которые определяются по экспериментальным данным.

Литература

1. Fu YH., Zhang HO., Wang GL., Wang HF. Investigation of mechanical properties for hybrid deposition and micro-rolling of bainite steel // *Journal of materials processing technology*. 2017. V.250. Pp. 220-227.
2. Junaid M., Khan F.N., Rahman K., Baig M.N. Effect of laser welding process on the microstructure, mechanical properties and residual stresses in Ti-5Al-2.5 Sn alloy. // *Optics and laser technology*. 2017. V.97. Pp. 405-419.
3. Huang H., Tsutsumi S., Wang JD., Li LQ., Murakawa H. High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets // *Finite elements in analysis and design*. 2017. V.135. Pp. 1-10.
4. Vasileiou A.N., Smith M.C., Balakrishnan J., Francis J.A., Hamelin C.J. The impact of transformation plasticity on the electron beam welding of thick-section ferritic steel components // *Nuclear engineering and design*. 2017. V.323. Pp. 309-316.
5. Seo S., Huang EW., Woo W., Lee S.Y. // Neutron diffraction residual stress analysis during fatigue crack growth retardation of stainless steel // *International journal of fatigue*. 2017. V.104. Pp. 408-415.
6. Hossain S., Zheng G., Truman C. E., Smith D. J. Application of multiple analysis methods in optimising complex residual stress characterisation // *Experimental techniques*. 2017. V.41(5). Pp. 483-503.
7. Артемьев Д.М., Буканов В.А., Садкин К.Е., Ильин А.В. Моделирование методом конечных элементов релаксации остаточных напряжений при послесварочном отпуске крупногабаритной конструкции из высокопрочной стали // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. №S1. С. 130-136.
8. Сурин В.И., Абу Газал А.А., Алвахеба А.И., Шеф Е.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Расчетно-экспериментальный метод моделирования остаточных напряжений в сварных соединениях // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2018. № 2(170). С. 48-55.
9. Пономарёв К.Е., Стрельников И.В. К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях (обзор) // *Сварка и диагностика*. 2018. № 2. С. 27-32.
10. Ломаев Г.В., Вахитов Р.Н., Кулешова Д.С., Мусалимов А.Н., Камалова Ю.Б. Исследование возможности оценки остаточных напряжений в зоне сварного соединения методом эффекта Баркгаузена // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2012. № 2(20). С. 117-120.
11. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. Stresses in Circular Plates with Rigid Elements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1015, 052028. doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052028.
12. Леонов В.П., Михайлов В.И., Сахаров И.Ю. Сварка и надежность титановых морских конструкций // *Вопросы материаловедения*. 2014. №4(80). С. 156-161.
13. Рыбакина О.Г., Нигматуллин В.И. Влияние асимметрии цикла, обусловленной остаточными сварочными напряжениями, на циклическую трещиностойкость металлов // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2010. № 56(340). С. 97-106.
14. Yildirim H.C. Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints // *International journal of fatigue*. 2017. V.101(2). Pp. 408-420.
15. Yukhymets P., Gopkalo A., Zecheru G., Mihovski M. Residual Life of Pipeline with Volumetric Surface Defect in the Weld Zone // *International journal of offshore and polar engineering*. 2016. V.26(3). pp. 272-277.
16. Pritykin A. Stress concentration in castellated I-beams under transverse bending // *Mechanika*, 2016, V. 22(6). Pp. 466-473.
17. Gornostajev D, Aryassov G and Penkov I Calculation method for optimization of barge hull // *International Review of Mechanical Engineering*. 2016. No 10(2). Pp. 115-124
18. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. М.: Физматлит, 2002. 416 с.
19. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. (2016) Definition of Locked-up Stresses Around a Rectilinear Welding Seam // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, V.124, 012094. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012094.

References

1. Fu YH., Zhang HO., Wang GL., Wang HF. (2017) Investigation of mechanical properties for hybrid deposition and micro-rolling of bainite steel. *Journal of materials processing technology*, V.250, Pp. 220-227.
2. Junaid M., Khan F.N., Rahman K., Baig M.N. (2017) Effect of laser welding process on the microstructure, mechanical properties and residual stresses in Ti-5Al-2.5 Sn alloy. *Optics and laser technology*, V.97, Pp. 405-419.
3. Huang H., Tsutsumi S., Wang JD., Li LQ., Murakawa H. (2017) High performance computation of residual stress and distortion in laser welded 301L stainless sheets. *Finite elements in analysis and design*, V.135. Pp. 1-10.

4. Vasileiou A.N., Smith M.C., Balakrishnan J., Francis J.A., Hamelin C.J. (2017) The impact of transformation plasticity on the electron beam welding of thick-section ferritic steel components. *Nuclear engineering and design*, V. 323, pp. 309-316.
5. Seo S., Huang E.W., Woo W., Lee S.Y. (2017) Neutron diffraction residual stress analysis during fatigue crack growth retardation of stainless steel. *International journal of fatigue*, V. 104, pp. 408-415.
6. Hossain S., Zheng G., Truman C. E., Smith D. J. (2017) Application of multiple analysis methods in optimising complex residual stress characterisation. *Experimental techniques*, V. 41(5), pp. 483-503.
7. Artem'yev D.M., Bukanov V.A., Sadkin K.E., Il'in A.V. (2018) Modelirovaniye metodom konechnykh elementov relaksatsii ostatochnykh napryazheniy pri poslesvarochnom otpuske krupnogabaritnoy konstruksii iz vysokoprochnoy stali. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, No S1, pp. 130-136.
8. Surin V.I., Abu Gazal A.A., Alvakheba A.I., SHef E.A., Bokuchava G.D., Papushkin I.V. (2018) Raschetno-eksperimental'nyy metod modelirovaniya ostatochnykh napryazheniy v svarnykh soyedineniyakh. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve*, No 2(170), pp. 48-55.
9. Ponamarev K.E., Strel'nikov I.V. (2018) K voprosu vybora eksperimental'nogo metoda otsenki ostatochnykh napryazheniy v svarnykh konstruksiyakh (obzor). *Svarka i diagnostika*, 2018. No 2. pp. 27-32.
10. Lomayev G.V., Vakhitov R.N., Kuleshova D.S., Musalimov A.N., Kamalova Yu.B. (2012) Issledovaniye vozmozhnosti otsenki ostatochnykh napryazheniy v zone svarnogo soyedineniya metodom effekta Barkgauzena. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve*, No 2(20), pp. 117-120.
11. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. (2018) Stresses in Circular Plates with Rigid Elements. *Journal of Physics: Conference Series*, V. 1015, 052028. doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052028.
12. Leonov V.P., Mikhaylov V.I., Sakharov I.Yu. (2014) Svarka i nadezhnost' titanovykh morskikh konstruksiy. *Voprosy materialovedeniya*, No 4(80), pp. 156-161.
13. Rybakina O.G., Nigmatullin V.I. (2010) Vliyaniye asimmetrii tsikla, obuslovlennoy ostatochnymi svarochnymi napryazheniyami, na tsiklicheskuyu treshchinostoykost' metallov. *Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova*, No 56(340), pp. 97-106.
14. Yildirim H.C. (2017) Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints. *International journal of fatigue*, V.101(2), pp. 408-420.
15. Yukhymets P., Gopkalo A., Zecheru G., Mihovski M. Residual (2016) Life of Pipeline with Volumetric Surface Defect in the Weld Zone. *International journal of offshore and polar engineering*, V.26(3), pp. 272-277.
16. Pritykin A. (2016) Stress concentration in castellated I-beams under transverse bending. *Mechanika*, V. 22(6), pp. 466-473.
17. Gornostajev D., Aryassov G., Penkov I. (2016) Calculation method for optimization of barge hull. *International Review of Mechanical Engineering*, No 10(2), pp. 115-124
18. Gorshkov A.G., Starovoytov E.I., Tarlakovskiy D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti*. Moskva, Fizmatlit, 2002. 416 p.
19. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Sharkov O.V. (2016) Definition of Locked-up Stresses Around a Rectilinear Welding Seam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, V.124, 012094. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012094.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.01.(047)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ОБВОДОВ МАЛОМЕРНОГО РЫБОЛОВНОГО ТРАУЛЕРА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ**Евгений Андреевич Чуреев**
аспирантКалининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: e.chureev@klgtu.ru**Аннотация**

Современные малые и маломерные рыболовные суда характеризуются большой полнотой обводов для обеспечения достаточных объемов рыбных трюмов и относительно большими скоростями движения. В процессе проектирования судов данного типа одной из основных и наиболее сложных задач является разработка формы корпуса судна. Для успешного решения указанной задачи необходим комплексный подход: стремление не только к минимизации сопротивления воды движению судна, но и обеспечение мореходности судна в условиях короткого волнения Балтийского моря. Использование математических инструментов при оценке мореходных качеств судов не может обеспечить необходимую точность расчетов. Наиболее достоверные результаты на ранних этапах проектирования могут быть получены только в результате проведения экспериментов с моделями судов в опытовом бассейне, причем масштабный эффект должен быть минимальный. В данной работе представлены результаты модельных испытаний маломерных рыболовных судов с анализом влияния формы корпуса на различные мореходные качества.

Ключевые слова: рыбопромысловое судно, траулер, форма корпуса, сопротивление воды движению судна, рыбная промышленность, Балтийское море, добыча морских биоресурсов, оптимизационное проектирование судна.

STUDY OF THE GEOMETRIC SHAPE OF A SMALL FISHING TRAWLER IN AN EFFORT TO IMPROVE ITS SEA-KEEPING CHARACTERISTICS**Evgeniy A. Chureev**

Postgraduate Student

Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: e.chureev@klgtu.ru**Abstract**

Modern small size fishing vessels are characterized by hull fullness to ensure sufficient volumes of fish holds and relatively high speeds. In the process of designing vessels of this type, one of the main and most difficult tasks is to design the shape of the hull. For a successful solution of this task, an integrated approach is needed: aiming not only at minimization of water resistance, but also at ensuring sea-keeping performance of the vessel in the Baltic Sea. The use of mathematical tools in assessing sea-keeping capacities of vessels cannot provide the necessary accuracy of calculations. The most reliable results at the early design stages can be obtained only by experiments with models of vessels in the experimental tank, provided that the scale effect should be minimal. This paper presents the model test results of small-sized fishing vessels with an analysis of the effect of hull shape on various sea-keeping characteristics.

Key words: fishing vessel, trawler, hull form, water resistance, fish industry, Baltic Sea, harvesting of aquatic bioresources, optimization ship design.

Введение

Для рыбопромышленников Калининградской области работа в Балтийском море ограничивается, в основном, 26 подрайоном. Из материалов анализа в работах [1] и [2], однозначно можно сделать вывод, что воспроизводить старые проекты судов нецелесообразно и необходимо создавать абсолютно новый флот для добычи рыбы на Балтике.

Новый флот – новый тип малого рыболовного судна – преимущественно для современного тралового промысла. Согласно [2], оптимальный архитектурно – конструктивный тип судна для промысла на Балтийском море должен иметь следующие основные отличительные особенности:

- судно должно быть траулером, так как в данном регионе это является основным способом лова в 26 подрайоне Балтийского моря;

- на судне должны быть оборудованы танки для хранения улова наливом. При этом, в случае промысла донных пород рыбы, должна быть предусмотрена возможность оборудования сухого трюма для хранения рыбы в ящиках со льдом;

- машинное отделение должно быть размещено в кормовой части судна с прямой валопиной;

- рубка на судне должна быть промыслово-рулевой и установлена в средней части судна, возможно смещенной в корму от миделя, что позволит лучше контролировать и управлять промысловыми операциями из рубки. Также смещение в корму центра парусности улучшит управляемость судна;

- судно должно иметь две палубы или удлиненную баковую надстройку. В шельтердечном пространстве должно быть размещено, по возможности, наибольшее количество оборудования для минимизации промысловых операций на открытой палубе;

- корпус судна должен быть оборудован носовым бульбом: в целях улучшения поведения судна на коротком крутом волнении Балтийского моря;

- на судне должен быть установлен рыбонасос для перекачивания улова из трала в рыбный танк;

- рыбный танк на судне должен быть охлаждаемым при помощи системы RSW и/или с использованием льдогенераторов (предпочтительнее генераторы жидкого льда);

- на борту судна должен быть установлен гидравлический кран или другое грузовое устройство, предназначенное для подключения приемного шланга рыбонасоса к кутку трала, либо для выливки улова из трала частями;

- при ведении промысла донных пород рыб, предварительная обработка улова должна проходить в закрытых помещениях.

Наиболее существенными достижениями в области технологии промысла, повлиявшими на архитектурно-конструктивный тип и назначение малотоннажных рыболовных судов, являются:

- появление новых сверхуловистых отечественных донных и пелагических тралов, например, разработанных в регионе Калининградской области фирмой «Фишеринг сервис» г. Пионерский. Этой фирмой разработаны тралы, которыми сейчас пользуется практически вся Европа. Разовые уловы рыбы при тралении новыми тралами, не могут быть целиком подняты на промысловую палубу судов. Поднятие улова невозможно по нескольким причинам: как по величине вылова, при которой невозможно обеспечение остойчивости добывающего судна, так и по размещению кутка трала на промысловой палубе. В связи с этим, появилась необходимость откачивать рыбу из тралов рыбонасосами или эрлифтами, не поднимая трал из воды. С другой стороны, добывающие суда из-за значительных величин выловов, потеряли возможность обработки улова на судне, т. е. стали чисто добывающими;

- для возможности сохранения значительных уловов рыбы на современных промысловых судах они должны быть или супертраулерами, или траулерами - производственными рефрижераторами. Эксплуатация этих типов судов в условиях исключительных экономических зон России должна проходить по другой схеме

организации взаимодействия промысловой и береговой региональной инфраструктуры. В противном случае, добывающие суда должны стать судами с наливными танками;

- появление носовых бульбовых наделок (носовых бульбов), функционально расширяющих их традиционное назначение.

Следует отметить, что первоначально бульбовые формы носа на судах, эксплуатируемых при числах Фруда 0,25-0,35, предназначались для снижения волнового сопротивления за счет интерференции волн от корпуса судна и специально спроектированного носового бульба. Носовой бульб уменьшал амплитуду носовой волны и увеличивал длину корпуса, что приводило к уменьшению чисел Фруда и уменьшению волнового сопротивления.

Однако уже на рубеже 1980-х годов в европейской практике стали появляться носовые бульбы и на тихоходных судах, которые устраивались только с целью увеличения конструктивной длины подводной части корпуса. Бульбы в кормовой оконечности судна обеспечивали выравнивание потока и подтекание к ахтерштевню. Относительные скорости движения малотоннажного флота, достигали величин $Fr = 0,40 - 0,50$, поэтому изменились рекомендации проектантам по выбору параметров формы и элементов корпуса промысловых судов длиной от 12 до 26 м. Ранее опубликованные рекомендации проектантам были получены по результатам мореходных испытаний моделей судов ФРП с традиционными в то время обводами корпусов. Эти мореходные испытания выполнялись опытными бассейнами мира по заданию ФАО (Food and Agriculture Organization of the United Nations) и были опубликованы в открытой печати в сборнике *Fishing Boats of the World (part 3.P. 139-169, P. 540)*.

Однако, с тех пор, существенно изменился ходовой режим малотоннажного промыслового флота, резко возросли мощности главной силовой установки, усилились требования к повышению мореходности.

Первоначально бульбовые формы корпуса объяснялись конструкторами как возможность снижения сопротивления воды движению среднетоннажных и крупнотоннажных судов и значительно лучшими условиями удифферентовки судов.

В 2000-е годы носовые бульбы появились даже на малотоннажных судах, длиной 8 – 10 метров, что объяснялось требованием повышения мореходности малотоннажных судов флота рыбной промышленности (ФРП) на волнении. Суда с традиционными обводами зарывались в подошве коротковолнового волнения. Появились две формы бульбовых обводов: исландского типа с большой полнотой мидель-шпангоута (рис. 1) и норвежского типа, с так называемыми, мореходными обводами (рис 2).

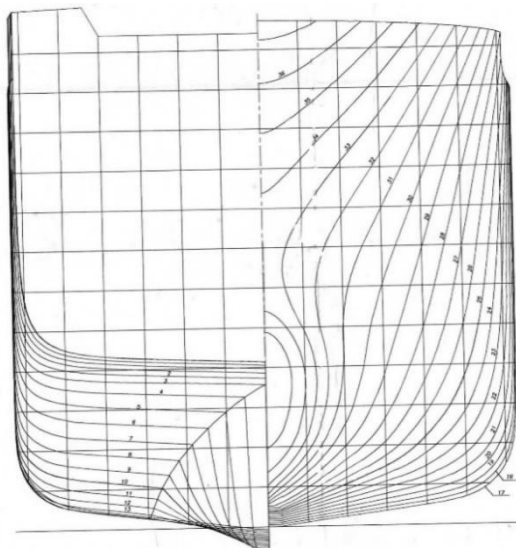


Рис. 1 Теоретический корпус с бульбовыми обводами по исландскому типу

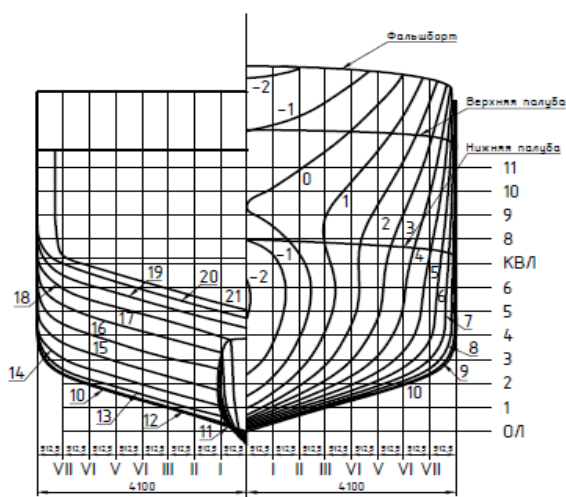


Рис. 2 Теоретический корпус с бульбовыми обводами по норвежскому типу

Таким образом, можно отметить, что в конце прошлого века сформировалась концепция использования носовых бульбов: с одной стороны, для выравнивания ватерлиний (уход от S-образности) в подводной части носовой оконечности достаточно широких корпусов судов ФРП, а с другой – появилась теория «прорывания» носовым бульбом волн встречного волнения.

1. Форма корпуса

Форма корпуса (подводная часть), в первую очередь, зависит от режима работы судна. Для работы на Балтике, учитывая небольшое удаление районов промысла от берега, достаточны скорости свободного хода до 12 узлов. При длине судна 24 метра, это соответствует числам Фруда до 0,39-0,40, но в большинстве случаев, подобные суда эксплуатируются рыбаками на экономических режимах – 10 – 11 узлов, что соответствует $F_r = 0,32 - 0,36$. Не секрет, что данные числа Фруда соответствуют переходным режимам хода, при

которых начинает формироваться сопутствующая волна, длина которой увеличивается с увеличением числа Фруда и при достижении $F_r = 0,4$ подошва волны перемещается в район кормового перпендикуляра, при этом резко увеличивается сопротивление.

Для приближенной оценки мореходных качеств, в первую очередь сопротивления воды движению судна, на ранних этапах проектирования, используют серийные диаграммы результатов модельных испытаний. Если обратиться к справочнику по теории корабля [4], то можно увидеть диапазоны изменения характеристик моделей, которые были испытаны в рамках серийных модельных испытаний. Помимо справочной литературы, в настоящее время имеются достаточное количество программных продуктов, которые позволяют производить расчеты буксировочного сопротивления на ранних стадиях проектирования. Одной из наиболее зарекомендовавших себя программных продуктов является ПО Maxsurf. Данное программное обеспечение позволяет производить расчеты буксировочного сопротивления глиссирующих судов (методы Савитского, Бланта и Фокса, Вэймана), водоизмещающих судов (методы Вэймана, Холтропа, Комптона, Фанга, Ван Оортмерссена, 60 серии) и яхт. Наиболее подходящими методами определения сопротивления для малых траулеров являются методы Холтропа, Комптона и Ван Оортмерссена.

Проанализировав справочную литературу и описание к ПО Maxsurf, можно увидеть, что современные полные формы корпусов маломерных промысловых судов типа МРТК не подходят (по отношению L/V и коэффициенту продольной полноты ϕ) ни под одну из доступных серий модельных испытаний. Это создает определенные проблемы при определении мощности главного двигателя судна на начальных этапах проектирования. Конечно, один из ключевых факторов при выборе мощности ГД является сопротивление трала и буксировочная мощность комплекса "судно + трал" на скоростях до 4-6 узлов (в зависимости от типа трала). Как показывают результаты проектных проработок, необходимая буксировочная мощность комплекса "судно + трал" на тралении больше, чем необходимая буксировочная мощность на свободном ходу. Данный факт зачастую наталкивает проектантов на мысль, что при наличии избыточной мощности ГД судна на свободном ходу, вопросами оптимизации формы корпуса, с целью уменьшения сопротивления воды движению судна, можно пренебречь.

Данное мнение не бесспорное. При проектировании малых и маломерных судов для таких акваторий, как Балтийское море, необходимо уделять особое внимание вопросам поведения судна на волнении - всхожесть на волну, заливаемость рабочих пространств открытых палуб, характеристикам килевой и бортовой качки и ходкости. Оптимизационное проектирование с целью решения этих вопросов позволит сократить время простоя судна из-за плохих метеоусловий, и одновременно улучшить условия пребывания людей на судне. Дополнительно, при минимизации

сопротивления воды движению судна, будет появляться экономический эффект из-за экономии топлива на переходах от берега до места промысла и обратно.

2. Экспериментальное исследование

Исследование одного из вопросов оптимизации формы корпуса судов данного класса было проведено в лаборатории мореходных качеств судов Научно-исследовательского центра судостроения ФГБОУ ВО "КГТУ" на примере исследования влияния носового бульба на мореходные качества.

МРТК "Марлин" пр. В-410 польской постройки, принадлежащий одной из рыбопромышленных организаций Калининградской области. Указанное судно - траулер. После переоборудования под загрузку улова наливом получил сильный дифферент на нос, в результате чего, в процессе эксплуатации, обнаружилась серьезная проблема заливаемости с носа на крутом коротком волнении Балтийского моря. Теоретический чертеж МРТК "Марлин" пр. В-410 представлен на рис. 3, а основные данные по судну представлены в таблице 1. Явление заливаемости судна с носа не позволяло полностью заполнять танки уловом, что, в свою очередь, негативно сказывалось на экономике судна.

С целью исправления ошибки, допущенной при переоборудовании указанного судна под наливное, одна из проектных организаций Калининградской области разработала проект модернизации судна, который заключался в изменении носовой оконечности - установки носовой бульбовой наделки. Теоретический чертеж судна "Марлин" с бульбообразной носовой оконечностью представлен на рис. 4.

Для предварительной оценки результата, из-за трудностей расчета заливаемости и ходкости судна с бульбом расчетными методами, в лаборатории мореходных качеств судов НИЦС КГТУ были проведены исследования на масштабных моделях судов в опытовом бассейне без и с носовым бульбом.

По договоренности с Заказчиком, комплекс исследований включал в себя:

- буксировочные испытания модели судна на тихой воде (сопротивление);
- испытания модели судна на встречном регулярном волнении с длиной волны 0,8L; 1,0L и 1,2L при скорости судна 5 узлов (при проверке на заливаемость), где L – длина судна. Здесь принята единая длина для всех вариантов – 24,4 м, как длина от транца до пересечения бульба с форштевнем. При обработке буксировочных испытаний – принималась фактическая длина по ватерлинии.

В результате данных сравнительных модельных испытаний можно было увидеть, что буксировочное сопротивление на модели судна с бульбом на полной скорости (10,5 узлов) на 15÷20% меньше (в зависимости от состояния загрузки), в отличие от модели судна без бульба. Однако, при одинаковой массе груза, на модели с бульбом на скорости около 8,5 узлов наблюдалось увеличение буксировочного сопротивления в районе 30% от исходной модели.

Таблица 1

Основные данные МРТК «Марлин»

Тип судна, название	Малый рыболовный траулер кормового траления «Марлин»
Назначение	Траловый лов
Район плавания	Водные бассейны разряда «М-СП 3,5»
Длина габаритная	25,8 м
Длина по КВЛ	24,3 м
Ширина габаритная	7,20 м
Ширина по КВЛ	7,20 м
Высота борта	3,49 м
Высота надводного борта	0,316 м
Осадка по ГВЛ	3,18 м
Водоизмещение	264 т
Расчетная скорость свободного хода	10,5 узлов

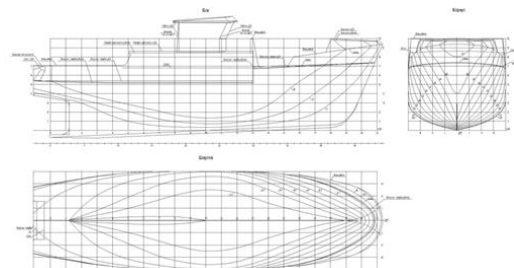


Рис.3. Теоретический чертеж МРТК «Марлин» пр. В-410

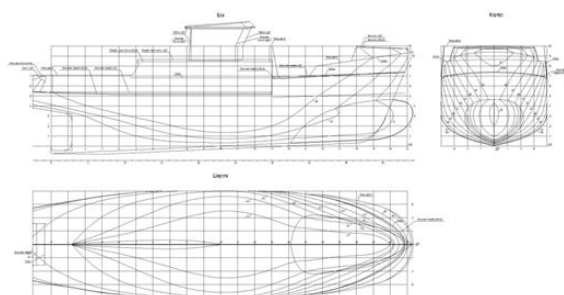


Рис.4. Теоретический чертеж МРТК «Марлин» с бульбообразной носовой оконечностью

Данные показания объясняются неблагоприятным, с точки зрения ходкости, обтеканием носовой оконечности судна при данной посадке судна и подтверждает, что характеристики бульба могут быть оптимальными только на одной определенной скорости.

В отношении заливаемости носовой части судна: в опытах интенсивность заливания определялась по толщине слоя воды, принимаемой моделью на перекрытие козырька в процессе продольной качки на встречном волнении. Замеры показали, что все варианты подвержены заливаемости в той или иной степени. Однако, интенсивность заливания вариантов с бульбом все же меньше, чем без бульба. Из сравнения замеров вариантов, можно заключить, что на данном судне решающую роль играет высота надводного борта в носу. Ее увеличение хотя бы на метр сыграло бы существенную роль в уменьшении заливаемости.

Увеличение надводного борта может быть обеспечено не только за счет высоты козырька, но и за счет установки волнолома на перекрытии козырька по всей ширине судна в этом месте.

Помимо исследований, проводимых с моделью т/х "Марлин", в лаборатории мореходных качеств судов выполнялись исследования модели МРТК нового типа, основные размерения которого представлены в таблице 2, а теоретический чертеж представлен на рис.5.

Данная модель являлась результатами эскизной проработки МРТК, выполненной конструкторским бюро «Адомат» (г. Светлый, Калининградская область).

Таблица 2

Основные размерения МРТК нового типа

Тип судна, название	МРТК нового типа
Назначение	Лов и перевозка рыбы
Длина между перпендикулярами	23,1 м
Ширина габаритная	8,50 м
Ширина по КВЛ	8,50 м
Расчетная скорость свободного хода	11,0 узлов

Теоретический чертеж	См. рис. 5
----------------------	------------

Исследования проводились с целью определения поведения судна на тихой воде в следующих случаях нагрузки (посадки) судна (таблица 3):

Таблица 3

Случаи нагрузки судна

Наименование	1 случай нагрузки	2 случай нагрузки	3 случай нагрузки
Посадка судна	T=3,80 м Ровный киль	T _H =3,43м; T _K =4,17м	T _H =2,71м; T _K =3,91м

В результате исследований было выявлено, что по достижению ожидаемых скоростей движения судна (9-12 узлов) наблюдалось сильное увеличение буксировочного сопротивления и достаточно большой ходовой дифферент на нос. Кривые изменения остаточного сопротивления и ходового дифферента модели судна представлены на рис. 6 и 7.

Исследования показали, что на переходных режимах наблюдался относительно большой ходовой дифферент на нос. Причиной этому может являться область низкого давления, образующаяся в районе наибольших объемов корпуса при обтекании жидкости на относительно больших числах Фруда, так и геометрическая форма носового бульба модели, которая может давать дифферентующий на нос момент в процессе движения. Особенно это можно увидеть на фотографиях носовой оконечности при проведении испытаний (рис. 8, 9, 10). Кроме того, анализ данных испытаний показывает явную взаимосвязь между ходовым дифферентом на нос (просадкой носовой оконечности) и резким ростом буксировочного сопротивления.

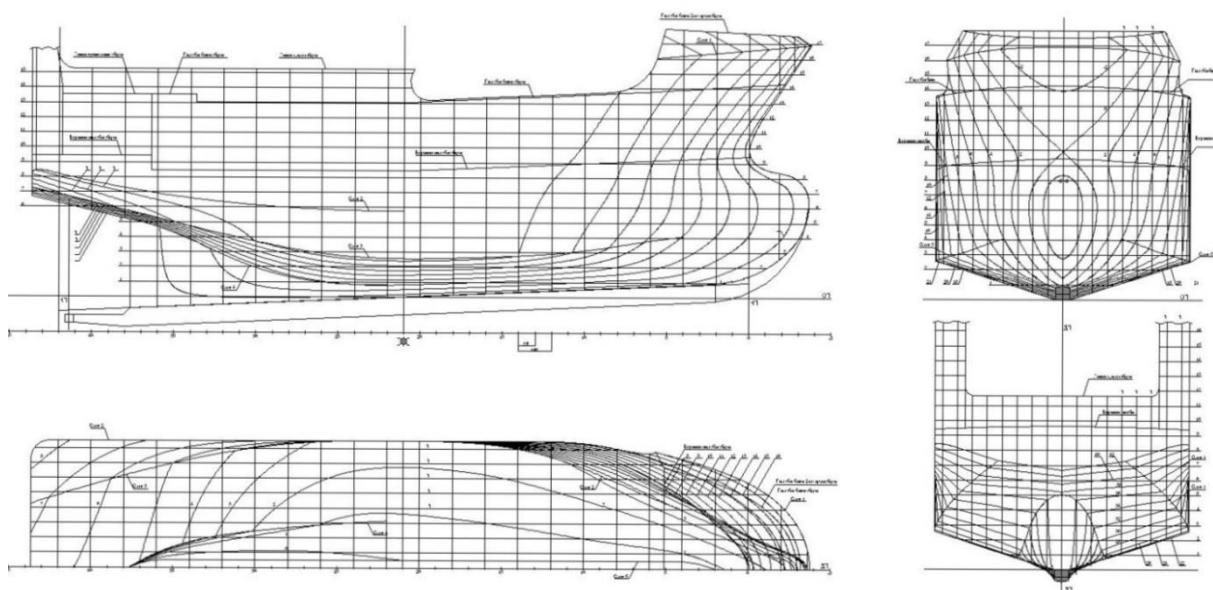


Рис. 5. Теоретический чертеж МРТК нового типа

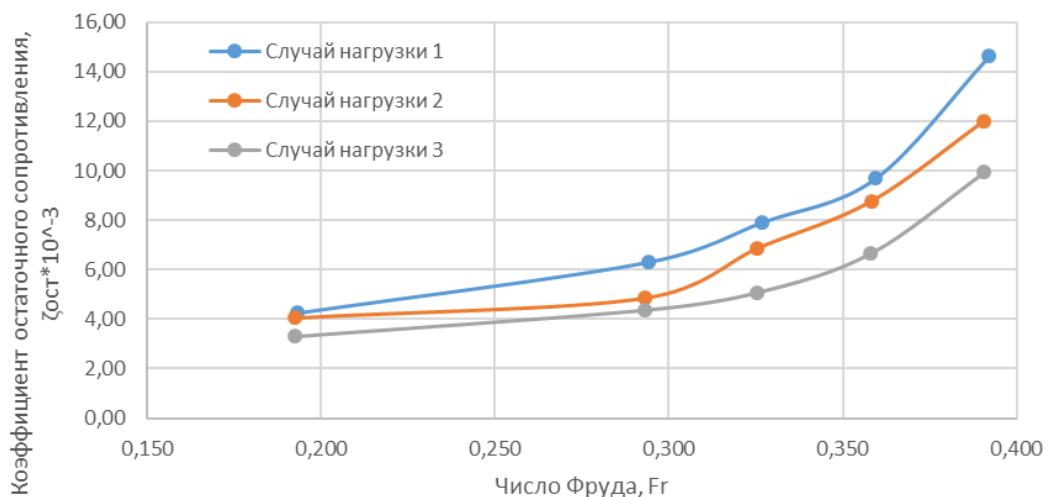


Рис. 6. Кривые коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

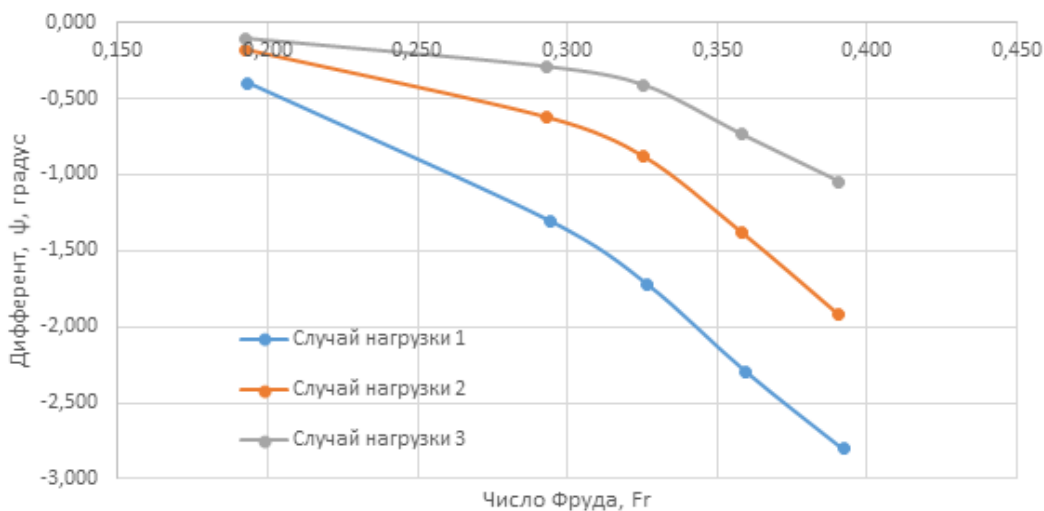


Рис. 7. Кривые изменения дифферента от числа Фруда



Рис. 8. Вид сбоку (форштевень) в 1 случае нагрузки. Скорость 11 узлов.



Рис. 9. Вид сбоку (форштевень) во 2 случае нагрузки. Скорость 11 узлов.



Рис. 10. Вид сбоку (форштевень) в 3 случае нагрузки. Скорость 11 узлов.

Заключение

Основываясь на вышеизложенном, можно сделать вывод, что подходить к вопросу проектирования формы корпуса для маломерных судов промысловых судов для акватории Балтийского моря необходимо с позиции комплексного решения задачи:

поведения судна на волне (всхожесть на волну, килевая качка, заливаемость открытых участков палубы),

наличия достаточных объемов в носовой оконечности (носовой бульб) для лучшей

удифферентовки судна в статике и минимизации ходового дифферента судна на нос;

формы носовой оконечности (в том числе бульба) судна для минимизации негативных явлений, описанных выше.

Следует отметить, что при решении задач по оптимизации мореходных качеств судов данного типа при помощи математических инструментов (программное обеспечение), трудно оценить ходовое изменение осадки и просадки судна. Поэтому, для их определения необходимы экспериментальные исследования с применением масштабных моделей в опытовых бассейнах.

Литература

1. Чуреув Е.А. Несоответствие мощностей промыслового флота и береговой инфраструктуры в Калининградской области // Материалы международного морского форума. Калининград: из-во БГАРФ, 2016. 1648 с.
2. Чуреув Е.А. К вопросу о выборе архитектурно-конструктивного типа малого рыболовного траулера для

- Балтийского моря // Труды V Международного Балтийского морского форума. Санкт-Петербург: Научно-исследовательский центр «Морские интеллектуальные технологии», 2017. 175 с.
3. Разработка концептуального проекта модернизации маломерного рыболовного траулера по типу пр. 1328 («Балтика»), для северо-западного региона России, с возможностью использования функции прохождения промысловой практики и обучения будущих специалистов отраслевых учебных заведений [Текст]: технический отчет./ ФГБОУ ВО «КГТУ»; рук. Злыгостев Д.В.; исполн.: Маслюк Е.В. [и др.]. Калининград, 2016. 121 с. (на правах рукописи).
 4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/ Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
 5. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учеб./ В.П. Иванов. Калининград: БГАРФ, 2010. 274с.
 6. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: монография в 2 т. / А. И. Гайкович. Санкт-Петербург: МОРИНТЕХ, 2014.

References

1. Chureev E.A. Nesootvetstvie moschnostey promyislovogo flota i beregovoy infrastrukturyi v Kaliningradskoy oblasti. Materialy mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kaliningrad: izdatelstvo BGARF, 2016. 1648 p.
2. Chureev E.A. K voprosu o vybore arhitekturno-konstruktivnogo tipa malogo rybolovnogo traulera dlya Baltijskogo moray. Trudy V Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma. Sankt-Peterburg: Nauchno-issledovatel'skij centr «Morskie intelektual'nye tekhnologii», 2017. 175 p.
3. Razrabotka kontseptualnogo proekta modernizatsii malomernogo rybolovnogo traulera po tipu pr. 1328 («Baltika»), dlya severo-zapadnogo regiona Rossii, s vozmozhnostyu ispolzovaniya funktsii prohozheniya promyislovoj praktiki i obucheniya buduschih spetsialistov otraslevyih uchebnyih zavedeniy [Tekst]: tehicheskiy otchet: FGBOU VO «KGTU»; ruk. Zlyigostev D.V.; ispoln.: Maslyuk E.V. [i dr.].Kaliningrad, 2016. 121 p. (na pravah rukopisi).
4. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomah. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli. Pod red. YA.I. Vojtkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985. 768 p.
5. Tehniko ekonomicheskie osnovyi sozdaniya rybolovnyih sudov: ucheb. V.P. Ivanov. Kaliningrad: izdatelstvo BGARF, 2010. 274 p.
6. Teoriya proektirovaniya vodoizmeschayuschih korabley i sudov : monografiya: v 2 t. A. I. Gaykovich. Sankt-Peterburg : MORINTEH, 2014

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.3.026.5(06)

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

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@kgtu.ru

Александр Петрович Шапошников

аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: shaposhnikoff@mail.ru

Аннотация

Электроэнергетическая система Калининградской области и технологически связанные с ней энергосистемы объектов морской индустрии Калининградской области готовятся к переходу в 2025 г. на работу в автономном режиме, отдельно от энергосистем стран Балтии и энергообъединения IPS/UPS, в котором они работают в настоящее время. Страны Балтии планируют перейти на синхронную работу в составе европейского энергообъединения UCTE. В работе рассмотрен баланс активной мощности в Калининградской энергосистеме при условии ее автономной работы и даны предложения по его обеспечению за счёт использования накопителей энергии на основе новейших технологий, что повысит устойчивость и безопасность энергосистемы в целом, а также приведены мероприятия направленные на повышение устойчивости и безопасности подчиненных энергосистем объектов морской индустрии.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, активная мощность, устойчивость, безопасность, электрическая станция, накопитель энергии, цифровая система управления.

IMPROVING STABILITY AND SAFETY OF THE ENERGY SYSTEM OF THE KALININGRAD REGION AND MARINE INDUSTRY OBJECTS USING ENERGY STORAGE UNITS

Valeriy F. Beley

DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: vbeley@kgtu.ru

Aleksandr P. Shaposhnikov

Postgraduate Student at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: shaposhnikoff@mail.ru

Abstract

The electric power system of the Kaliningrad region and the technologically related power systems of the marine industry objects in the Kaliningrad region are preparing for the transition in 2025 to work in an autonomous mode, separately from the power systems of the Baltic countries and the IPS / UPS power system in which they currently operate. The Baltic countries are planning to switch to synchronous work as part of the UCTE European energy association.

The paper considers the balance of active power in the Kaliningrad power system under the condition of its autonomous operation and offers suggestions to ensure it by using energy storage units based on the latest technologies, which will increase the stability and security of the power system as a whole; and it also shows measures aimed at improving the stability and safety of subordinates power systems of the marine industry objects.

Key words: electric power system, active power, stability, safety, electric power plant, energy storage unit, digital control system.

Введение

В связи переходом электроэнергетической системы Калининградской области в автономный режим работы вопросы устойчивого и безопасного электроснабжения региона и ответственных объектов морской индустрии становятся приоритетными. В Калининградской области завершено строительство трех новых тепловых станций, готовится к поэтапному вводу четвертая новая электростанция (Приморская ТЭС). Основное предназначение этих тепловых электростанций обеспечение базовой нагрузки энергосистемы. Для уменьшения колебаний нагрузки, резервирования питания нагрузки и поддержание в энергосистеме нормативных значениях частоты в работе анализируется использование для энергосистемы накопителей на основе литий-ионных аккумуляторов.

1. Развитие генерирующего комплекса Калининградской области

В настоящее время энергосистемы Калининградской области (КО) и стран Балтии работают в составе энергообъединения (ЭО) IPS/UPS (рисунок 1). В 2025 году энергосистемы стран Балтии планируют отделиться от ЭО IPS/UPS и подключиться на синхронную работу в составе ЭО UCTE. При этом энергосистема КО перейдет в автономный режим эксплуатации [1,2].

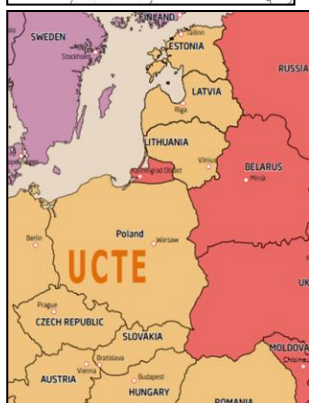


Рис. 1. Европейские энергообъединения

С целью обеспечения энергетической и политической безопасности автономная работа энергосистемы КО приобрела стратегическое значение. Однако автономная работа Калининградской энергосистемы до недавнего

времени была невозможна, что подтвердили аварии 2011 и 2013 годов, когда была потеряна связь по линиям электропередачи 330 кВ с ЭО IPS/UPS. В результате аварий Калининградская ТЭЦ-2 отключилась и была полностью обесточена западная часть региона, включая город Калининград и объекты морской индустрии (рисунок 2) [1].

На период аварий установленная мощность электростанций энергосистемы КО составляла 939,24МВт, причем доля Калининградской ТЭЦ-2 (КТЭЦ-2) - 94,4% (875 МВт). Общеизвестно: с учетом резервной мощности, а также требований устойчивости и надежности работы мощность наиболее мощного агрегата в энергосистеме, как показывает опыт эксплуатации, не должна превышать 2% установленной мощности энергосистемы. Мощность же наиболее крупной электростанции по тем же соображениям не должна превышать 8 - 12% установленной мощности энергосистемы.

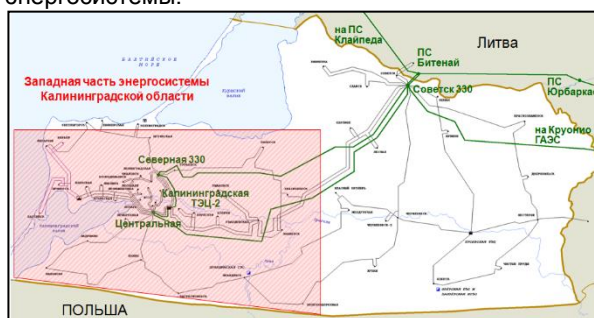


Рис. 2. Энергосистема КО и её обесточенная Западная часть во время аварий 2011 и 2013 годов (ЛЭП 330 кВ - зеленая линия; ЛЭП 110 кВ - голубая)

Для обеспечения функционирования энергосистемы КО в автономном режиме, Правительство РФ утвердило план мероприятий по обеспечению электроснабжения региона. Одним из основных мероприятий, является возведение четырех электростанций (таблица 1, рисунок 3) и перевода КТЭЦ-2 в режим работы полублоками [1].

Таблица 1

Объекты генерации энергосистемы КО

Название	Мощность, МВт	Топливо	Тип	КПД, %
Приморская ТЭС	195 (3x65)	уголь	ПСУ	35,6
Прегольская ТЭС	440 (4x110)	газ	ПГУ	52,1
Маяковская ТЭС	160 (2x80)	газ	ГТУ	36,0
Талаховская ТЭС	160 (2x80)	газ	ГТУ	36,0
КТЭЦ-2	450 (2x225)	газ	ПГУ	51,0

где: ПСУ – паросиловая установка, ПГУ – парогазовая установка, ГТУ – газотурбинная установка.

Следует отметить ряд недостатков по генерирующему комплексу. Все электростанции предназначены для работы в конденсационном режиме, что приводит к их низкой эффективности, а также доставка газа и угля в регион извне [1,2].



Рис. 3. Электроэнергетическая система Калининградской области

2. Анализ режимов работы Калининградской энергосистемы в автономном режиме

Современные энергосистемы характеризуются высокой степенью неравномерности суточного графика энергопотребления, что требует наличия манёвренного генерирующего оборудования для преодоления максимумов и минимумов нагрузок. Поэтому для автономной энергосистемы малой мощности живучесть и суточное регулирование мощности имеют первостепенное значение.

Суточное регулирование мощности энергосистемы КО планируется осуществлять тепловыми электростанциями с ПГУ и ПСУ, а резкие изменения нагрузок предполагается преодолевать за счёт манёвренности ГТУ.

На рисунке 4 показаны характерный среднесуточный график мощности потребления для зимнего рабочего дня в энергосистеме КО [3], уровень технического минимума перечисленных выше электростанций и возможный режим работы ТЭС Маяковской и ТЭС Талаховской.

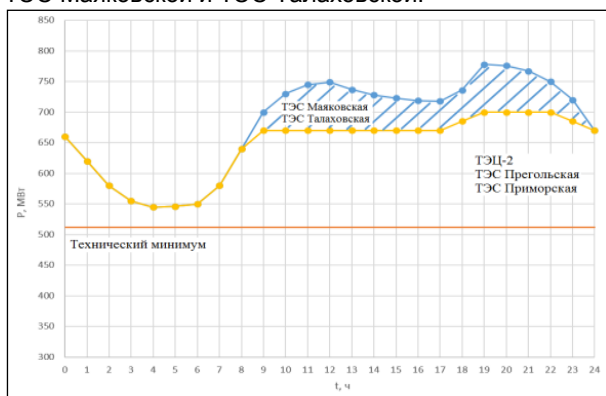


Рис. 4. Характерный график мощности потребления для зимнего рабочего дня в энергосистеме КО

Также благодаря своим техническим особенностям ГТУ отличается высокими показателями манёвренности, что и обуславливает повсеместное использование ГТУ для преодоления быстрых изменений нагрузки. Время с момента

подачи команды на запуск до выхода на номинальную мощность занимает до 10 – 20 минут. При аварийных ситуациях в энергосистеме осуществляется быстрый пуск ГТУ – менее чем за 5 минут [4]. Однако при возникновении аварийного небаланса, связанного с потерей генерирующей мощности, например самой большой в системе 225 МВт (публок КТЭЦ-2), может иметь место снижение частоты до 5,0 Гц при заданной нагрузке (рисунок 4).

Указанное явление может возникать при неблагоприятном сочетании ряда факторов: отсутствие резервов генерирующей мощности в условиях ремонтной компании, особенности регулировочных характеристик генераторов и устройств собственных нужд электростанций и другие. Данное явление носит название неустойчивость (лавина) частоты и зачастую приводит к полному погашению энергосистемы, так называемый «blackout».

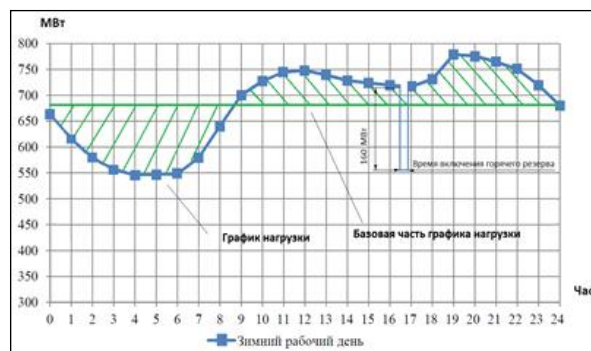


Рис. 5. Потеря мощности в энергосистеме КО

Переходной процесс изменения частоты $f(t)$ в энергосистеме при отключении от сети части генерирующей мощности ΔP , МВт и наличии вращающегося резерва описывается уравнением [4]:

$$f(t) = f_{НОМ} [1 - \Delta P \cdot \sigma / (P_{Т.НОМ} + K_{НГ} \cdot P_{НГ} \cdot \sigma) - 2 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sqrt{(A+B) \cdot \Delta P \cdot \cos(\Omega_{СОБ} \cdot t + \varphi)} / T_j], \tag{1}$$

где $f_{ном} = 50$ Гц – номинальная частота системы; $k_{нг} = 1,75 \div 2,5$ – коэффициент регулирующего эффекта нагрузки по частоте; $\sigma = 0,04 \div 0,05$ – статизм генерирующих агрегатов системы; $P_{т.ном}$ – номинальная мощность генерирующих агрегатов системы, находящихся в работе (МВт); T_j – эквивалентная постоянная инерции генерирующего оборудования; $\Omega_{соб}$ – собственная частота генераторов, определяется по формуле (2); A и B – коэффициенты зависящие от свойств генераторов (от T_j и σ); $\varphi = \arctg(B/A)$; T_s – эквивалентная постоянная времени регулятора частоты генераторных агрегатов

$$\Omega_{соб} = \sqrt{[(P_{т.ном}/\sigma \cdot T_s \cdot T_j) - 0,25 \cdot (1/T_s + 1/T_j)^2]} \quad (2)$$

$$\alpha = 0,5 \cdot (1/T_s + 1/T_j) \quad (3)$$

$$T_{jэ} = T_j / (k_{нг} \cdot P_{нг}) \quad (4)$$

Установившееся снижение частоты Δf , Гц в энергосистеме при отключении части генерирующей мощности ΔP , МВт и наличии горячего резерва генерирующей мощности определяется по [4]:

$$\Delta f = f_{ном} \cdot \Delta P \cdot \sigma / (P_{т.ном} + k_{нг} \cdot P_{нг} \cdot \sigma) \quad (5)$$

Снижение частоты в энергосистеме Δf , Гц при отключении от сети генерирующей мощности ΔP , МВт, при отсутствии резервов определяется по [4]:

$$\Delta f = (f_{ном} \cdot \Delta P) / (k_{нг} \cdot P_{нг}), \quad (6)$$

Анализ режимов работы энергосистемы в автономном режиме эксплуатации (рисунки 4 и 5) показывает, что в системе будут иметь место определенные трудности.

Во всём мире решением данной проблемы является добавление в энергосистему объекта способного аккумулировать электроэнергию. В настоящее время для этих целей в основном используются гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС). Они являются высокоманевренным источником мощности и в тоже время потребителем-регулятором, что можно назвать основным преимуществом данного типа электростанций перед другими (ТЭС, АЭС), так как регулировочный диапазон мощности ГАЭС не ограничен технологическим минимумом (рисунок 6).

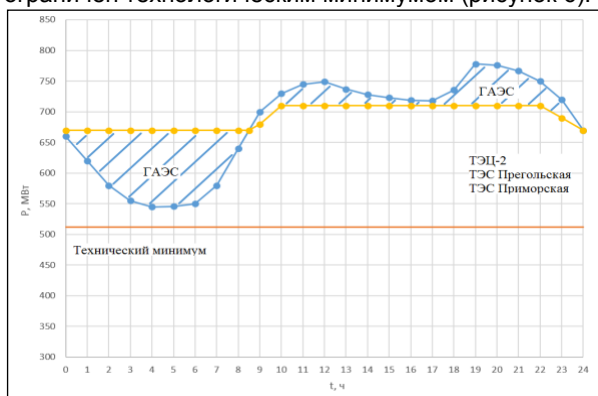


Рис. 6. Характерный среднесуточный график мощности потребления для зимнего рабочего дня в энергосистеме КО с учетом ГАЭС

Недостатки ГАЭС: низкий КПД – около 73%; высокие затраты на строительство; большие

площади для водоемов и связанные с этим трудности.

По своим маневренным характеристикам гидроагрегаты ГАЭС превосходят ГТУ. Пуск обратимых агрегатов ГАЭС из нерабочего состояния в турбинный режим с набором полной нагрузки составляет 2÷3 минуты. Пуск этих агрегатов в насосный режим из нерабочего состояния в зависимости от мощности машин и способа пуска колеблется в пределах 5÷6 минут. Время перевода из турбинного в насосный режим достигает 8÷10 минут [3,4]. Однако быстродействия ГАЭС при потери мощности недостаточны.

В последние годы в мире для уменьшения колебаний нагрузки, резервирования питания нагрузки, поддержания в энергосистеме нормативных значений частоты используются накопители на основе литий-ионных аккумуляторов (рисунок 7,8).

Накопитель имеет: аккумуляторы, инверторно-выпрямительный блок, СТК. Выбор накопителя в первую очередь проводится по двум параметрам: мощности и энергии аккумуляторной батареи. Мощность выбирается по величине возможно теряемой мощности, а энергия по обеспечению зарядно-разрядного суточного цикла режима работы энергосистемы (рисунок 6). Несомненное достоинство накопителя – быстродействие в доли секунды.



Рис. 7. Литий-ионный накопитель SDG&E (Калифорния, 2017 г.) 30 МВт, емкость 120 МВт·ч.

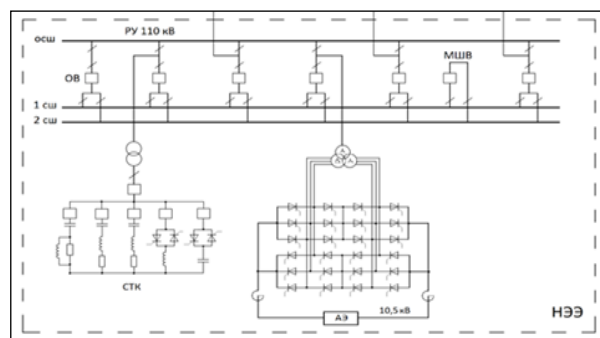


Рис. 8. Структурная схема подключения накопителя электрической энергии к сети

На рисунке 9 показаны графики изменения частоты в энергосистеме при отключении от сети генерирующей мощности $\Delta P = 160$ МВт (отключение Талаховской ТЭС или Маяковской ТЭС) без резерва мощности (группа кривых II) и при наличии быстродействующего накопителя энергии мощностью 160 МВт (группа кривых I) для различных характеристик нагрузки. Как видно из графиков частота напряжения в энергосистеме

стремится к установившемуся значению 49,6 Гц, что удовлетворяет требованиям нормативных документов. Указанные графики переходного процесса получены на упрощенной математической модели энергосистемы в программе Matlab-Simulink.

Необходимо отметить, что наряду с потерей активной генерирующей мощности, приводящей к небалансу активной мощности, возникает дефицит и небаланс реактивной мощности в энергосистеме, который может привести к «лавине напряжения» - критическому снижению напряжения на объектах. Поэтому накопитель энергии целесообразно объединять со статическим тиристорным компенсатором (СТК – рисунок 8.). СТК включает фильтр высших гармоник, источником которых является инверторно-выпрямительный блок накопителя.

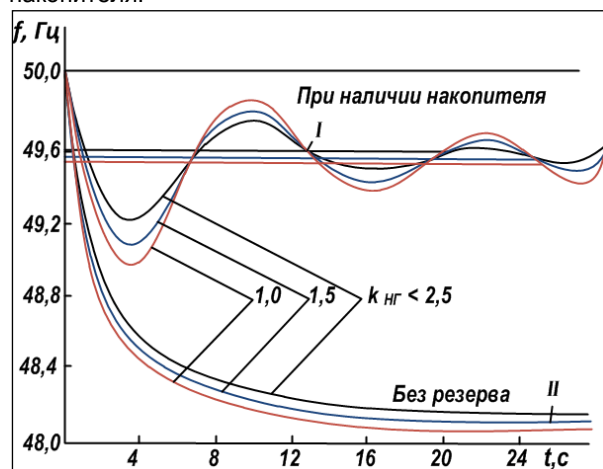


Рис. 9. Характер изменения частоты в энергосистеме при наличии быстродействующего накопителя энергии и различных характеристиках нагрузки.

3. Устойчивость и безопасность электроэнергетических систем объектов морской индустрии

К электроэнергетическим системам объектов морской индустрии КО следует относить:

- электроэнергетическую систему Базы Балтийского флота и ее опорные ПС 60 кВ О-36 Балтийск, ПС 110 кВ Морская и ПС 110 кВ Светлый;
- электроэнергетические системы Морского и Рыбного портов с опорными ПС 110 кВ О-17 Рыбный порт и ПС 110 кВ О-2 Янтарь (рисунок 10);

- энергосистемы судостроительного завода «Янтарь» и судоремонтных «Преголь» и «Светловский»;
- Порт «Пионерский» с опорными ПС 110 кВ О-10 Зеленоградск и ПС 110 кВ О-62 Пионерская.

Все указанные электроэнергетические системы объектов морской индустрии (рисунок 10) подключены и являются технологически зависимыми от электроэнергетической системы КО. В большей степени это касается такого общественного режимного параметра, как частота напряжения.

Для обеспечения их устойчивости и безопасности по отношению к возможным аварийным небалансам активной мощности (устойчивости частоты) в условиях автономной работы энергосистемы региона необходимо: завершить ввод в работу Приморской ТЭС и оценив итоговые величины резервов генерирующей мощности в различные периоды в течении года определить необходимую величину мощности быстродействующего накопителя электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и интегрировать его в Западной части энергосистемы КО совместно с современной быстродействующей цифровой системой управления.



Рис. 10. Объект морской индустрии - Калининградский Морской торговый порт

Заключение

В работе проанализировано текущее состояние и перспективы развития электроэнергетической системы КО и технологически связанных энергетических систем объектов морской индустрии. Показано, что обеспечение баланса активной мощности системы за счет установки накопителя энергии на основе новейших технологий позволит повысить устойчивость и безопасность энергетических систем региона, в том числе объектов морской индустрии.

Литература

1. Белей В.Ф. Анализ вариантов развития электроэнергетики стран Балтии и Калининградской области / IV МЕЖДУНАРОДНЫЙ БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 896-909.
2. Белей В.Ф., Горбатов Д.С. Повышение надежности электроснабжения объектов морской индустрии и Калининградской области / Морские интеллектуальные технологии, 2017, № 4(38), Т.2. С.83-87.

3. Белей В.Ф., Зарицкий В.А. Исследование возможности использования гидроаккумулирующей электростанции в энергосистеме Калининградской области / Вестник молодежной науки, 2018 №1 (13). С.14.
4. Венников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1985. 536 с., ил.

References

1. Beley V.F. Analiz variantov razvitija jelektrojenergetiki stran Baltii i Kaliningradskoj oblasti. IV MEZHdUNARODNYJ BALTIJSKIJ MORSKOJ FORUM [Jelektronnyj resurs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2016. Pp. 896-909.
2. Beley V.F., Gorbatov D.S. Povyshenije nadezhnosti jenergosnabzhenija objectov morskoi industrii i Kaliningradskoj oblasti. Morskije intellektualnye tehnologii, 2017, № 4(38), Т.2. Pp.83-87.
3. Beley V.F., Zaritskij V.A. Issledovanije vozmoznosti ispolzovanija gidroakkumulirujushej elektrostancii v jenergosisteme Kaliningradskoj oblasti. Vestnik Molodezhnoj nauki, 2018 №1 (13).14 p.
4. Vennikov V.A. Perehodnyje jelectromehanicheskie process v jelektricheskijh sistemah: Ucheb. dlya jelektroenerget. spec. vuzov. 4-je izd. pererab. i dop. M.: Vyssh. shk., 1985. 536 p., il.

УДК 621.9.047/048

АДАПТАЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ СУДОРЕМОНТА

Марк Борисович Лещинский

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного машиностроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1, 379/1
e-mail: mark.leschinsky@klgtu.ru

Тимофей Русланович Никулин

заместитель декана по науке факультета автоматизации производства и управления
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1, 379/6
e-mail: timofey.nikulin@klgtu.ru

Аннотация

Проанализированы условия проведения газопламенных работ в условиях судоремонта. Сформулированы требования к конструкции электролизно-водного генератора, для решения технических задач в условиях судоремонта. Изготовлена система автоматизации работы ЭВГ. Авторами спроектирована и изготовлена линейка опытных экземпляров электролизно-водных генераторов (ЭВГ), производительностью 600 и 900 литров газа в час. Изготовленные устройства эксплуатировались ведущими специалистами портовой судовой мастерской предприятия ООО «МореСервис» и персоналом, обучающим сварке в ГБУ КО ПОО "Прибалтийский судостроительный техникум". В испытаниях проводилась газовая сварка стальных труб различного профиля и размеров, а также высокотемпературная пайка образцов из стали и цветных сплавов, с использованием водородно-кислородного пламени, обогащенного парами углеводородных соединений. Качество сварных и паянных швов отвечают технологическим требованиям предприятий, проводивших соответствующие испытания. В конце статьи подведены выводы.

Ключевые слова: электролиз; газопламенные работы: сварка; пайка; резка; водородно-кислородное пламя, щелочные аккумуляторы.

ADAPTATION OF AN ELECTROLYSER FROM THE PERSPECTIVE OF SHIP-REPAIR

Mark B. Leschinskiy

PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automated Machine Building
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: mark.leschinsky@klgtu.ru

Timofey R. Nikulin

Deputy Dean for Research at the Faculty of Production and Control Automation
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: timofey.nikulin@klgtu.ru

Abstract

Conditions for conducting gas-flame works under ship repair conditions have been analyzed. Requirements for the design of a water electrolytic generator have been formulated for solving technical problems under ship repair conditions. A system for the automation of WEG has been made. The authors have designed and manufactured a line of prototypes of water electrolytic generators (WEG) with a capacity of 600 and 900 liters of gas per hour. The manufactured devices have been operated by leading specialists of the port ship workshop of "SeaService" LLC and the personnel who are studying welding at Baltic Shipbuilding Technical School. The tests included gas welding of steel pipes of various profiles and sizes, as well as high-temperature soldering of samples from steel and non-ferrous alloys, using oxyhydrogen flame enriched with hydrocarbon vapors. The quality of the welded and soldered seams meet the technological requirements of the enterprises that conducted the relevant tests. At the end of the article, conclusions are made.

Key words: electrolysis, gas-flame works, welding, soldering, cutting, oxyhydrogen flame, alkaline accumulators.

Введение

При выборе оптимальных технологий в любых отраслях хозяйства не мало важным условием считается их энергетическая эффективность. Такой подход применим, в том числе и для условий судоремонта.

Не смотря на широкое применение в судоремонте электродуговых технологий проведения сварочных процессов газопламенные методы обработки металлов применяются тем не менее достаточно широко. В частности, к этим работам относятся сварка изделий из различных металлов и их сплавов, а также технологии высокотемпературной пайки. Данные работы традиционно производятся с использованием газобаллонного оборудования с применением таких газов, как ацетилен-кислород или пропанобутановой смеси с кислородом.

Используемые газопламенные технологии обладают существенными недостатками, к которым относятся повышенные требования безопасности к хранению, транспортировке и использованию, большие массогабаритные характеристики оборудования, а также повышенные эксплуатационные расходы, то есть необходимость относительно частой заправки баллонов газом.

В качестве газа-заменителя традиционных газовых смесей может быть использован водород. Согласно исследованиям [1, 59 с.], водород имеет коэффициент замены ацетилена 2, что позволяет его использования взамен ацетилена для решения технологических задач.

Водородно-кислородную смесь можно получать при помощи мобильных электролизно-водных генераторов (ЭВГ). Такая замена позволит отказаться от баллонного хозяйства. Также, продуктом сгорания водородно-кислородной смеси является перегретый пар, что положительно скажется на экологических характеристиках рабочего места.

Для решения технологических задач применительно к условиям судоремонта была оптимизирована конструкция мобильного ЭВГ, разработанного на кафедре автоматизированного машиностроения ФГБОУ ВО КГТУ [2,3,4,5].

Анализ сферы применения ЭВГ

Для проведения ремонта различных систем и механизмов на судах проводятся следующие работы, регламентируемые правилами безопасности :

- газовая сварка и резка;
- плазменная резка;
- электросварка;
- нагрев деталей открытым огнем;
- пайка.

То есть помимо плазменной резки и электросварки, традиционно применяется газобаллонное оборудование. Вес комплекта баллонов ацетилен/кислород составляет порядка 160 кг, что затрудняет его использование, а также запрещено:

- использовать шланги длиной от 10 до 40 метров;
- прокладывать шланги по путям эвакуации людей, трапам, коридорам и т. п.;

- прокладывать шланги вблизи источников тепла и электропроводов;
- продувать ацетиленовый шланг кислородом и кислородный шланг ацетиленом, а также взаимозаменять шланги при работе;
- допускать соприкосновение кислородных баллонов, редукторов и оборудования с маслами и промасленной одеждой и ветошью;
- устанавливать газовые баллоны во внутренних помещениях судна;
- переносить баллоны на плечах и руках.

Такие ограничения связаны с повышенной опасностью баллонов, то есть при не штатной ситуации возможно распространения огня в сторону, противоположную истечения газовой струи, к источнику газа (обратный удар).

Согласно правилам, ПБ 03-598-03, и правилам эксплуатации сосудов под давлением, при условии, что рабочее давление ЭВГ будет ниже 0,07 МПа, запрет на эксплуатацию такого оборудования в помещениях не накладывается. Таким образом, мобильные ЭВГ можно будет использовать в помещениях, тем самым упростить условия проведения газопламенных технологий, а также позволит оборудовать рабочее место сварщика там, где есть такая необходимость.

Исходя из указанных работ, а именно газовая пайка, сварка и оплавление металла, а также правил безопасности [7,8], разрабатываемые ЭВГ должны иметь рабочее давление не выше 0,07 Мпа, производительность по газу должна быть минимальной, и определяться по условиям решаемых технологических задач, а также иметь многоступенчатую активную и пассивную системы защиты от обратного удара, а режим работы ЭВГ должен быть автоматизирован.

Таким образом, конструкция ЭВГ должна включать в себя следующие элементы:

1. Основной блок, изготовленный на базе щелочных аккумуляторов нужной емкости с соответствующей адаптацией под поставленные задачи.
2. Ресивер – элемент конструкции, обеспечивающий электролитом базовые ячейки электролизера на разных режимах работы, который выполняет кроме того роль одного из элементов пассивной защиты и роль буферной емкости уменьшающей вероятность заброса капель электролита в выходные магистрали.
3. Редукционный клапан, установленный на выходе из ресивера, позволяет создать в базовых ячейках электролизера рабочее давление и выполняет роль элемента пассивной защиты.
4. Блок гидрозатворов – элемент пассивной защиты электролизера от обратного удара, предотвращает также попадание паров электролита в выходные магистрали и выполняет роль барботера, позволяющего регулировать состав газовой смеси дозированными добавками углеводородных соединений.
5. Пламегасящие вставки – элемент пассивной защиты для от обратного удара.
6. Горелку с набором наконечников, для выполнения газопламенных работ при различных режимах.
7. Элементы системы автоматики.
8. Источник питания.

Результаты исследований

Согласно составленным условиям и задачам был спроектирован и изготовлен ЭВГ, представленный на рис. 1.



Рис 1. Элементы ЭВГ

1- блок гидравлических затворов; 2- регулировка подрывного клапана; 3- редукционный клапан; 4- реле давления; 5- ресивер; 6- ячейка ЭВГ; 7- вентиляторы продувки ЭВГ; 8- индикатор уровня жидкости; 9- тепловое реле.

Произведённая в электролизёре водород-кислородная газовая смесь пропускается через блок гидравлических затворов 1, состоящий из двух одинаковых затворов. Один из них выполняет задачу барботера, который необходим для управления составом газовой смеси. Блок затворов выполняет роль пассивной защиты если газ начинает сгорать в направлении противоположном своему истечению и скорость его сгорания выше, чем скорость его истечения, то есть при возникновении обратного удара (регулировка подрывного клапана осуществляется гайкой 2). Эту же роль, то есть роль защиты выполняют огнегасящие вставки на выходе из гидравлических затворов, а также редукционный он же невозвратный клапан 3 и столб электролита в ресивере 5. Таким образом, ячейки ЭВГ 6 защищены от воспламенения генерируемой газовой смеси (обратного удара) 4-х ступенчатой пассивной защитой.

Разработанная конструкция огнегасящей вставки, которая появилась в последних моделях ЭВГ, при ее относительной простоте показала очень

высокую эффективность (Рис. 2). Необходимость в этом дополнительном элементе показали испытания устройства в условиях двух предприятий, а именно в цеху предприятия по производству коммерческих холодильных витрин ООО «Метал Фрио Солюшинз».

Необходимость в разработке такого дополнительного устройства возникла не потому, что были недостаточны имеющиеся в системе предохранители, защищающие ЭВГ от обратного удара, а из-за относительной шумности срабатывания подрывного клапана гидравлического затора. То есть потенциальные потребители нашего оборудования попросили минимизировать пугающий их шум при открытии клапана. При этом хочется отметить, что система защиты срабатывала именно из-за ошибок и неумения использования устройством. Встроенные в выходные шланги керамические вставки 2 с капиллярными каналами во время всех проведенных нами испытаний полностью убрали вероятность срабатывания предохранительного клапана.

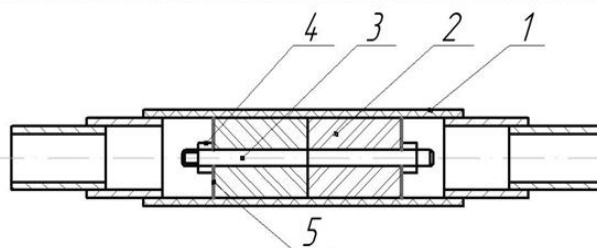


Рис. 2. Огнегасящая вставка

1- резиновый рукав; 2- керамическая вставка; 3- шпилька; 4- шайба с уплотнителем; 5- гайка.

При модернизации устройства рассматривались два алгоритма автоматизации его работы, а именно мехатронная система управления и классическая – релейная. Были проведены соответствующие эксперименты. Разработанная мехатронная система (Рис. 3) обладает определенным полезным набором опций, например, динамичное отслеживание плотности электролита, его температуры, производительности по газу и т. д. Тем не менее, её сложность и необходимость наличия дополнительных относительно дорогостоящих датчиков пока говорит не в пользу применения мехатроники и рассматривается как перспективная.

Классическая – релейная система автоматизации работы ЭВГ включает в себя редукционный клапан, электромеханическое реле давления и тепловое реле (Рис. 4). Кроме того,



а)

б)

в)

Рис.4. Элементы системы автоматики
а) редукционный клапан; б) реле давления; в) тепловое реле.

Рабочее давление в ресивере (Рис. 4) установлено 0,07 МПа, на это давление и отрегулирован редукционный клапан в), это давление регламентировано «Правилами безопасности при производстве водорода методом электролиза воды ПБ 03-598-03» [6]. В случае повышения давления в системе ЭВГ до величины 1,2МПа сработает реле давления б), которое отключит ток в системе инверторного блока питания. Если давление в системе снизится до величины 0,06МПа, реле давления подключит блок питания и ЭВГ начнет генерировать рабочую смесь газов.

В случае превышения расчетной температуры блока ЭВГ сработает тепловое реле в), которое отключит ток в системе блока питания, а после продувки корпуса ЭВГ с помощью вентиляторов, и понижения температуры ток вновь будет подаваться к блоку питания, а значит возобновиться генерация газовой смеси. Таков алгоритм работы релейной системы автоматики ЭВГ.

Результаты испытаний ЭВГ

Изготовленное устройство эксплуатировалось работниками портовой судовой мастерской предприятия ООО «МореСервис» и персоналом, обучающим сварке в ГБУ КО ПОО "Прибалтийский судостроительный техникум".

система, использует все элементы автоматики свойственные типово-



Рис.3. Электронная плата мехатронной системы управления ЭВГ

му сварочному инверторному источнику питания и элементы индикации как-то манометр и светодиодные индикаторы режима работы.

В ходе испытаний проводилась сварка с использованием генерируемой газовой смеси обогащенной углеводородным соединением следующих образцов:

- стальной профильной трубы Ст3, 50мм X 50мм, толщиной 5 мм;
- стальной трубы Ст3, диаметром 1 дюйм, толщиной 2 мм;
- стальной пластины Ст 03, толщиной 2 мм;
- стальной арматуры Ст5сп диаметром 10 мм.

Для сварки стальных образцов применена сварочная проволока СВ 08Г-2.

По результатам испытаний были сделаны выводы, из которых следует, что качество сварных швов, полученных с использованием водородно-кислородного пламени, генерируемого ЭВГ, обогащенного парами углеводородов соответствует требованиям предприятия ООО «МореСервис» и испытываемое оборудование может быть использовано для учебных целей в ГБУ КО ПОО "Прибалтийский судостроительный техникум".

Выводы

- Проанализированы возможности применения ЭВГ в условиях судоремонта.
- Сформулированы требования к конструкции ЭВГ.

➤ Спроектирован и изготовлен опытный образец ЭВГ, соответствующий правилам безопасности проведения газопламенных работ на судах.

➤ Разработана схема автоматизации работы устройства.

➤ Интегрированы пламегасящие вставки – элементы пассивной защиты для от обратного удара.

Изготовленное устройство эксплуатировалось работниками портовой судовой мастерской предприятия ООО «МореСервис» и персоналом, обучающим сварке в ГБУ КО ПОО "Прибалтийский судостроительный техникум".

Литература

1. Корж В.Н. Обработка металлов водородно-кислородным пламенем/ В.Н.Корж, Ю.С.Попиль. Киев: Экотехнологія, 2010. 194 с.
2. Патент РФ №2508970 РФ. Устройство для газопламенных работ. / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №7, 2014
3. Патент на полезную модель РФ №152029. Устройство для газопламенных работ. / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №12, 2015
4. Патент на полезную модель РФ №153615. Устройство для газопламенных работ. / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №21, 2015
5. Патент на полезную модель РФ №163325. Устройство для газопламенных работ. / М.Б. Лещинский, Т.Р. Никулин, В.Р. Загацкий. Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №19, 2016
6. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды (ПБ 03-598-03). Серия 03. Выпуск 37 / Колл. авт. 3-е изд., испр. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 110 с.

References

1. Korzh V.N. Obrabotka metallov vodorodno-kislorodnym plamenem [Metal processing of using hydrogen-oxygen flame], Kiev, Ekotehnologija, 2010. 194 p.
2. Leshhinskij M.B., Zagackij V.R. Patent RF №2508970 RF. Ustrojstvo dlja gazoplammennyh rabot [Equipment for gas flame works] «Patenty i poleznye modeli» №7, 2014
3. Leshhinskij M.B., Zagackij V.R. Patent na poleznuju model' RF №152029. Ustrojstvo dlja gazoplammennyh rabot [Equipment for gas flame works] «Patenty i poleznye modeli» №12, 2015
4. Leshhinskij M.B., Zagackij V.R. Patent na poleznuju model' RF №153615. Ustrojstvo dlja gazoplammennyh rabot [Equipment for gas flame works] «Patenty i poleznye modeli» №21, 2015
5. Leshhinskij M.B., Nikulin T.R., Zagackij V.R. Patent na poleznuju model' RF №163325. Ustrojstvo dlja gazoplammennyh rabot [Equipment for gas flame works] «Patenty i poleznye modeli» №19, 2016
6. Safety rules 03-598-03. Safety rules for the production of hydrogen by electrolysis of water. Moscow. Koll. avt. Publ., 2014. 110 p.(In Russian)

УДК 629.5.023

ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ДЕФЕКТАЦИИ КОРПУСА СУДНА

Артем Владимирович Мысник

аспирант кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: artem9306@gmail.com

Аннотация

Целью настоящей работы является представление нового метода ведения процесса дефектации роботизированными электронно-оптическими приборами с последующей автоматической разработкой плазовой документации. Были проанализированы существующие инструменты проведения дефектации и указаны их главные недостатки. Проведен сравнительный анализ технических характеристик роботизированных электронно-оптических приборов и очерчена их область применения в судостроительном производстве при изготовлении и монтаже деталей, секций, блоков. Определены пути модернизации предлагаемого процесса дефектации с использованием роботизированных электронно-оптических приборов. Представлены подробные примеры использования роботизированных электронно-оптических приборов с программной обработкой в процессе дефектации и создания плазовой документации в судоремонте. Представлен алгоритм процесса проведения дефектации. Установлено, что при применении комплекса «роботизированный электронно-оптический прибор–программа обработки» процесс дефектации выполняется значительно быстрее, а результаты наглядны, точны и позволяют проводить автоматическое проектирование плазовой документации как для ручной сборки заменяемых элементов корпуса судна, так и с использованием роботизированных сборочно-сварочных станков.

Ключевые слова: технология судоремонта, дефектация, роботизированный электронно-оптический прибор, трекер, тахеометр, ручной лазерный сканер.

APPLICATION OF ROBOT-AIDED ELECTRO-OPTICAL METHODS FOR FAULT DETECTION OF A SHIP HULL

Artyom V. Mysnik

Postgraduate Student at the Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: artem9306@gmail.com

Abstract

The purpose of this work is to present a new method of conducting the process of detection of robot-aided electro-optical devices with the subsequent automatic development of lofting documentation. The existing tools for fault detection have been analyzed; their main deficiencies have been identified. A comparative analysis of the technical characteristics of robot-aided electro-optical devices has been carried out, and their application in the shipbuilding industry in manufacturing and installation of parts, sections, blocks has been outlined. The ways of modernization of the proposed process of fault detection using robot-aided electro-optical devices have been determined. Detailed examples of the use of robot-aided electro-optical devices with software processing in fault detection and creation of lofting documentation in ship repair have been presented. The algorithm of the fault detection process has been introduced. It has been found that with the use of the “robot-aided electro-optical device – processing programme” complex, the process of fault detection is carried out much faster, and the results are clear, accurate and allow for the automatic design of lofting documentation both for the manual assembly of replaceable vessel hull elements and welding machines.

Key words: ship repair technology, fault detection, robot-aided electro-optical device, tracker, tachymeter, handheld laser scanner.

Введение

Контроль уровня надежности судна в процессе эксплуатации обеспечивается периодическим освидетельствованием его корпуса с целью выявления недопустимых корпусных деформаций с последующим их устранением [3,4,5]. В настоящее время, при дефектации применяются инструменты, такие как: линейки, щупы, микрометры, оптические и

индикаторные инструменты и др. Проведение работ такими инструментами имеет следующие недостатки:

- возведение строительных лесов или работы с крановой люльки;
- влияние погодных условий;
- время обработки результатов сопоставимо со временем проведения измерений;

-результаты таких измерений ненаглядны и требуют подробного описания;
 -сложность в выполнении дефектации корпусных конструкций с двоякой кривизной.

позволяющие размечать построечные места секций и места установки деталей, проводить замеры геометрии готовых секций и блоков, контролировать положение секции или блока при установке на стапеле. Для решения этих задач уже используются приборы, указанные ниже (табл. 1).

1.Описание электронно-оптических приборов, применяемых в судостроении

В судостроении нашли применение роботизированные электронно-оптические приборы,

Таблица 1

Технические характеристики применяемых приборов

№ п/п	Модель	Габариты и вес	Точность
1.	Тахеометры		
2.	Sokkia iX	Габариты прибора, мм: 290x180x205 Габариты контроллера, мм: 250x112x63 Вес измерительного блока, кг:5,5 Вес контроллера, кг: 2,7	Точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "':1, 2, 3 Точность / время измерения расстояний: без отражателя, мм± (2.0 мм + 2 ppm)/ 2с на отражающую пленку, мм:± (2.0 мм + 2 ppm)/ 2с на призму, мм: ± (1.0 мм + 2 ppm)/ 2с
3.	Leica TS60M	Габариты прибора, мм: 620x290x240 Вес прибора, кг: 7,6 кг	точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "':0,5 Точность / время измерения расстояний: отражатель: ± (1 мм + 1,5 ppm) / 1,5 с; любая поверхность : ± (2 мм + 2 ppm) /1,5 с
4.	Trimble S5	Габариты прибора, мм: 310x190x205 Габариты контроллера, мм: 150x100x63 Вес измерительного блока, кг: 6 Вес контроллера, кг: 2,7	Точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "': 3 Точность / время измерения расстояний: любая поверхность : ± (2 мм + 2 ppm) /1,5 с
5.	Трекеры		
6.	API Radian	Габариты прибора, мм: 177x177x355 Габариты контроллера, мм: 110x160x310 Вес прибора, кг: 9 Вес контроллера, кг: 3,2	Точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "': ±0,018 Точность измерения расстояний: ±10 мкм + 5 мкм/м , Время измерения: 1000 точек/с
7.	Leica AT409	Габариты прибора, мм: 188x221x351 Габариты контроллера, мм: 63x112x250 Вес прибора, кг: 7,3 Вес контроллера, кг: 0,8	Точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "': ±0,019 Точность измерения расстояний: ±15 мкм + 6 мкм/м Время измерения: 1000 точек/с
8.	FARO Laser Tracker	Габариты прибора, мм: 316 x 158 x 214 Вес прибора, кг: 4,8	Точность (с.к.о.) измерения угла одним приемом, "': ±0,020 Точность измерения расстояний: ±16 мкм + 8 мкм/м Время измерения: 1000 точек/с

Из таблицы видно, что трекеры и тахеометры имеют множество моделей, различающихся по весу, наличию контроллера и точности. Выбор приборов зависит от финансовых возможностей завода и требований к точности процесса дефектации. Следует отметить, что трекеры имеют более высокую точность, чем тахеометры. Однако тахеометры обладают меньшим весом и высокой мобильностью. Так же, за счет визирной трубы тахеометры могут наводиться на цель вручную. В то время как трекеры ориентируются только при помощи лазерного луча. Для увеличения плотности снимаемых точек и повышения скорости замеров трекеры могут быть модернизированы подключением ручных лазерных сканеров. При этом положение сканера в пространстве отслеживается лазерным лучом трекера.

Однако внедрение электронно-оптических приборов на судоремонтных предприятиях

продвигается медленно. Это связано с недоступными для большинства судоремонтных предприятий затратами на закупку комплекта оборудования и оплаты работы специалистов.

2.Пример применения электронно-оптических приборов в судоремонте

В качестве примера рассматривается случай дефектации наружной обшивки носовой оконечности судна с дефектом в области конструкции имеющей двоякую кривизну.

Процесс дефектации начинается с постановки судна в док, где выполняется очистка корпуса от обрастания, поврежденных лакокрасочных покрытий и окалины. Одновременно отдел плазовой подготовки отправляет специалистам трехмерную модель района, подлежащего дефектации с техническим заданием. По прибытии на место,

операторы производят установку лазерного трекера или тахеометра. Место установки прибора выбирается таким образом, чтобы охватить всю область дефектации. Для установки системы первый специалист расставляет треножный штатив, на него зажимным винтом крепит прибор и, при помощи элевационных винтов, выводит в положение близкое к горизонту. Второй специалист запускает портативный персональный компьютер с предустановленным программным продуктом «Spatial Analyzer» и, посредством протокола подключения Bluetooth, соединяется с прибором. Для этого выбирается функция «Прибор—Добавить прибор», затем указывается марка прибора и нажимается кнопка «Запустить интерфейс». Используя раздел автоматической съемки, второй специалист указывает верхний левый и нижний правый угол района сканирования. Когда прибор и программа готовы к работе, нажатием кнопки «Task», запускается процесс съемки. Длительность процесса от 15 до 20 минут в зависимости от величины зоны сканирования. Для сканирования поверхности с правого и левого борта требуется смена стоянки прибора. Для связывания нового положения с предыдущим используется функция «Locate—Измерить» номинальные точки». При работе с тахеометром, перед переходом, специалист наклеивает катафотные пленочные отражатели на устойчивые конструкции вокруг корпуса судна и производит их съемку вручную. После перестановки, используя вышеуказанную функцию, специалист производит съемку отражателей повторно. Проведя все операции, программа определяет новое положение прибора в съемочном пространстве. При работе с трекерами, вместо пленочных отражателей устанавливают отражающие призмы. По завершении сканирования с правого и левого борта на компьютере отображается результат (рис.1). Для обработки результатов можно использовать два метода. Первый использует среду «Spatial Analyzer». Второй заключается в переводе снятых точек в среду программного продукта AutoCAD. Выбор варианта

зависит от наличия у специалистов твердотельной модели судна в формате .STL или .IGS или каркасной модели в формате .DWG или .DXF. В первом варианте обработки специалист выгружает полученную от отдела плазовой подготовки модель в среду «Spatial Analyzer» и проводит совмещение функцией «Переместить объекты, минимизируя взаимосвязи». Программа вычисляет оптимальное положение снятых точек на твердотельной модели.

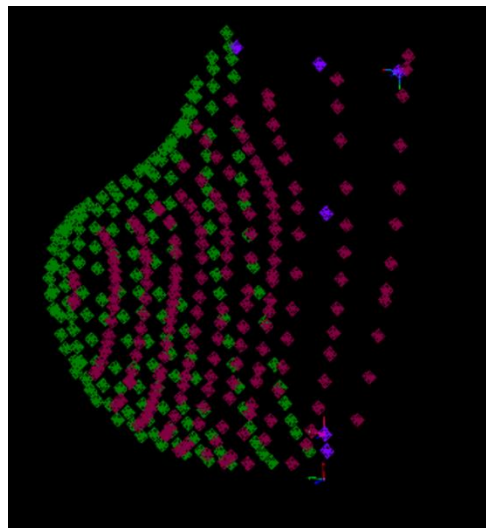


Рис. 1. Окончательные результаты сканирования

Программа строит вектора отклонений (рис.2), которые также являются стрелкой прогиба дефекта. Установив допусковые значения векторов в соответствии с [3], специалист определяет границы района, требующего ремонта. Для выявления дефектов, регламентированных [3], программа обладает широким спектром подпрограмм для постройки поверхностей по точкам сканирования с целью определения максимальной стрелки прогиба и сравнения ее с допусковым [3] значением.

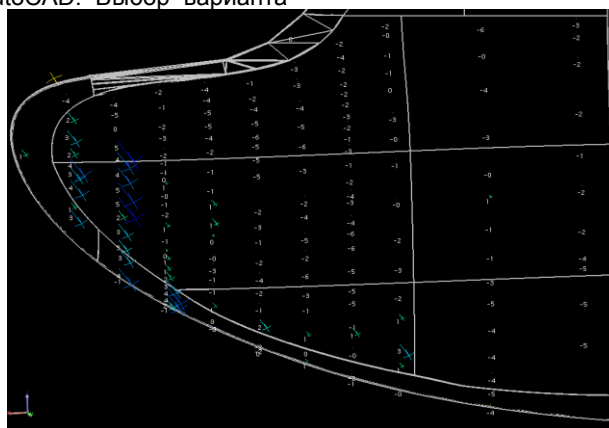


Рис.2. Результаты совмещения модели в среде «Spatial Analyzer»

Второй вариант обработки выполняется посредством функции «Файл—Экспорт—Файл DXF». Таким образом, осуществляется конвертация результатов из формата .XIT в доступный для программы AutoCAD формат .DXF. Из конвертированных точек с использованием функции

«Поверхность—Сеть» создается поверхность дефекта. В качестве привязки полученной поверхности к трехмерной модели используется место пересечения стыка и паза листа наружной обшивки. При помощи функции «Поверхность—Вычитание» создается трехмерная модель (рис.3),

которая легко поддается анализу с целью определения участка, подлежащего ремонту. Из результатов дефектации, при помощи программ автоматического проектирования, разрабатывается плазовая документация, а именно:

- чертежи раскроя для газорезательных машин;
- плазовые эскизы и таблицы полуширот и высот для изготовления заменяемой секции на сборочно-сварочных постелях;
- программы для роботизированных сборочно-сварочных станков, гибочных машин, сварочных тракторов.

По завершению дефектации результаты выгружаются на удаленный сервер для проведения дальнейшего анализа полученных корпусом дефектов с целью прогнозирования их поведения во время эксплуатации судна. Также выгруженные результаты могут быть использованы в дальнейшем как для задач судоремонта, так и для задач проектирования судов.

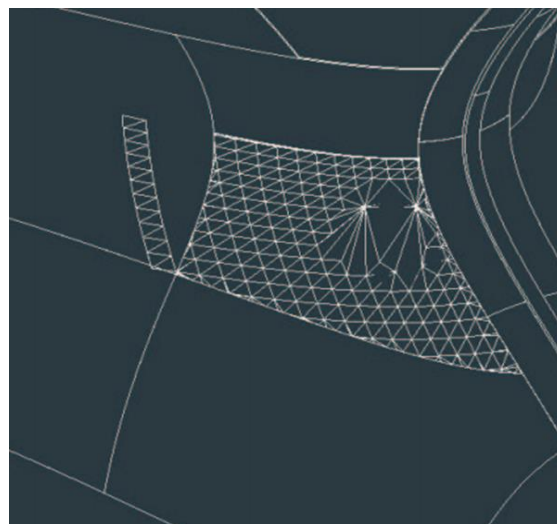


Рис.3. Результаты сведения моделей в среде AutoCAD

Основываясь на вышеизложенном примере применения электронно-оптических приборов в судоремонте процесс дефектации можно представить в виде блок-схемы (рис.4).

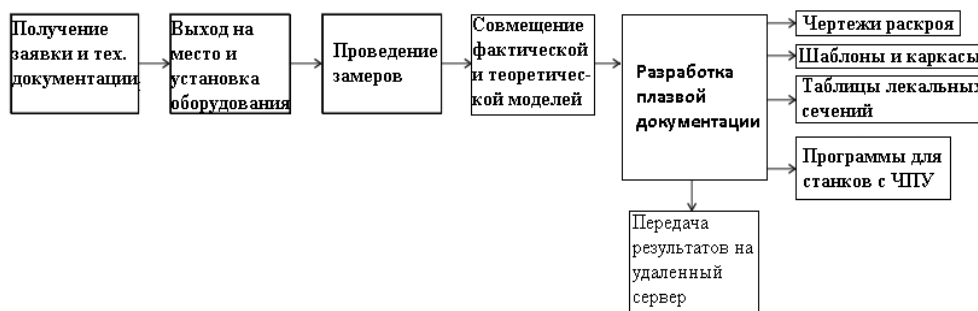


Рис.4. Блок-схема процесса проведения дефектации

Заключение

Таким образом, рассмотренные варианты проведения дефектации корпуса судна позволяют сделать следующие выводы:

1. Существующие методы дефектации корпусных конструкций с измененной геометрией (бухтины, вмятины, гофрировка) трудоемки и не позволяют обеспечить заданную точность.
2. Роботизированный электронно-оптический комплекс позволяет быстро, точно и без существенных затрат провести процесс дефектации.
3. Для увеличения плотности снимаемых точек и повышения скорости замеров роботизированный электронно-оптический комплекс можно

модернизировать, используя ручной лазерный сканер.

4. Результаты дефектации можно использовать для автоматического создания плазовой документации для широкой области сборочно-сварочных приборов.

5. Цифровой формат результатов по параметрам повреждений корпусов судов позволяет создать удаленный сервер для их хранения с целью накопления статистических материалов, необходимых как для задач судоремонта, так и для задач проектирования судов

6. Применение роботизированного электронно-оптического комплекса позволяет анализировать поведение прогрессирующих эксплуатационных дефектов.

Литература

1. Гаврилюк Л.П. Метрология трехмерных измерений в судостроении/ Л.П.Гаврилюк. СПб: ЦТСС, 2016. 206 с.
2. Телянер Б.Е., Турмов Г.П., Финкель Г.Н. Технология ремонта корпуса судна/ Телянер Б.Е., Турмов Г.П., Финкель Г.Н. Л.:Судостроение, 1984. 228 с.
3. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации / Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб: РМРС, 2014. 350 с.
4. Бураковский, Е.П. Совершенствование нормирования параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов / Е.П. Бураковский. Калининград: КГТУ, 2005. 339 с.

-
5. Бураковский, П.Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации: монография / П.Е. Бураковский. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. 298 с.

References

1. Gavrilyuk L.P. Metrologiya trekhmernykh izmerenij v sudostroenii (Metrology of three-dimensional measurements in shipbuilding). Saint Petersburg, SSTC, 2016. 206 p.
2. Telyaner B.E., Turmov G.P., Finkel' G.N. Tekhnologiya remonta korpusa sudna (Ship hull repair technology). Leningrad, Sudostroenie, 1984. 228 p.
3. Rossijskij Morskoy Registr Sudohodstva Pravila klassifikacionnykh osvidetel'stvovanij sudov v ehkspluatacii (Rules of classification surveys of vessels in operation). Saint Petersburg, RMRS, 2014. 350p.
4. Burakovskij, E.P. Sovershenstvovanie normirovaniya parametrov ehkspluatacionnykh defektov korpusov sudov (Improvement of regulation of parameters of operational defects of ship hulls). Kaliningrad, KSTU, 2005. 339 p.
5. Burakovskij, P.E. Obespechenie prochnosti korpusnykh konstrukcij sudov v processe ehkspluatacii: monografiya (Ensuring the strength of ship hull structures during operation). Kaliningrad, Izdatelstvo BFFSA, 2015. 298p.

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

УДК 621.12.061:628.169 (043)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ КАПЕЛЬ В ЖАЛЮЗИЙНОМ СЕПАРАТОРЕ
ПАРА С ПЛОСКИМИ ПЛАСТИНАМИ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ****Максим Игоревич Архипов**

аспирант кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: gromus08@bk.ru

Александр Георгиевич Филонов

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
судовых энергетических установок и теплоэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alexandr.filonov@kgtu

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность очистки вторичного пара в жалюзийных сепараторах судовых опреснителей. Объект исследований - сепараторы состоящие из плоских параллельных пластин сечением 100x100 мм с различными расстояниями между пластинами и способами установки в паровом объеме.

Эксперименты проводились на барботажном стенде с электрическим обогревом при давлении пара $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа. Солеосодержание испаряемой воды изменялось в пределах 10^3 - 10^5 мг/л. Эффективность сепараторов оценивалась по влажности пара после сепаратора и критической скорости пара в сепараторе.

Установлено, что уменьшение расстояния между пластинами с 5 мм до 1,7 мм увеличивает эффективность очистки пара в жалюзийном сепараторе, но приводит к снижению критической скорости пара. Показано, что значительное снижение влажности пара происходит уже после первого поворота потока пара в сепараторе.

Достоверность полученных данных подтверждается солевой методикой измерения влажности пара. Солёность анализируемых проб измерялась пламенным фотометром. Полученные данные могут быть использованы при проектировании паросепарационных устройств судовых опреснителей.

Ключевые слова: Судовая опреснительная установка, испаритель, барботаж, сепаратор пара с плоскими пластинами, капельный унос, критическая скорость пара в сепараторе, влажность пара.

**SEPARATION OF DROPS IN A CORRUGATED SCRUBBER WITH FLAT
PLATES AT LOW PRESSURES****Maksim I. Arkhipov**

Postgraduate Student of the Department of Ship Power Plants and Heat Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: gromus08@bk.ru

Aleksandr G. Filonov

PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants and Heat Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: alexandr.filonov@kgtu

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of the influence of structural and operating parameters on the efficiency of cleaning secondary steam in corrugated scrubbers of marine distillers. The object of the research is separators consisting of flat parallel plates with a section of 100x100 mm with different distances between the plates and installation methods in the steam region.

The experiments have been carried out on a air-lift stand with electric heating at a vapor pressure of $P = 0.101$ MPa and 0.0199 MPa. The salt content of the evaporated water varied in the range of

103-105 mg / l. The efficiency of the separators has been evaluated by the moisture content of the steam after the separator and the critical speed of the steam in the separator.

It has been found that reducing the distance between the plates from 5 mm to 1.7 mm increases the efficiency of steam cleaning in the corrugated scrubber, but leads to a decrease in the critical speed of the steam. It has been shown that a significant decrease in steam moisture occurs already after the first turn of the steam flow in the separator.

The reliability of the data obtained is confirmed by the salt method for measuring steam humidity. The salinity of the samples under analysis has been measured with a flame photometer. The obtained data can be used in the design of steam separation devices for marine distillers.

Key words: Marine distiller, evaporator, bubbling, steam separator with flat plates, drop priming, critical speed of steam in a separator, steam moisture.

Введение

Эффективность работы жалюзийных сепараторов пара судовых и стационарных дистилляционных опреснительных установок зависит от геометрических характеристик профиля канала пластин жалюзи, из которых собираются сепараторы, представленных на рис.1.

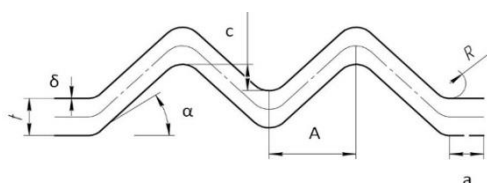


Рис. 1 Геометрические характеристики профиля криволинейного канала жалюзи

Наличие резких поворотов потока пара в криволинейном канале меняет режим его движения и условия сепарации капель испаряемой воды, уносимых вторичным паром в камере испарения аппарата [1-6].

Исключив влияние геометрических параметров криволинейного профиля: радиусагиба пластин R, числа ступеней сепарации n, половины угла поворота потока в криволинейном канале α, перекрытия одной пластины другой C, можно определить, как влияет расстояние между пластинами (шаг) t на величину конечной влажности пара после сепаратора ωк и критическую скорость пара в сепараторе Wкр.

Объектом исследований был выбран сепаратор поперечным сечением 100×100 мм, состоящий из прямых параллельных медных пластин длиной 86 мм и толщиной 0,5 мм с различным шагом t, который устанавливался вертикально, горизонтально и по схеме работы гравитационно-инерционного сепаратора (ГИС) с углом наклона пластин для дренажа влаги γ = 9° [6].

Сепаратор такой конструкции состоит из прямолинейных каналов прямоугольного сечения, в которых отсутствуют повороты потока пара и перекрытие одной пластины другой (рис. 2-3). Исследование пакета плоских параллельных пластин, установленного по схеме работы гравитационно-инерционного сепаратора, проводилось также с целью определения дополнительного эффекта сепарации капель от действия силы тяжести, так как действие центробежной силы, играющей существенную роль при осаждении влаги в криволинейном канале, здесь невелико.

Пакет плоских параллельных пластин может устанавливаться после вертикального жалюзийного сепаратора с традиционными волнообразными пластинами для дополнительного снижения ωк и увеличения допустимой скорости потока пара в аппаратах мокрой очистки газов химической промышленности [1]. В связи с этим, полученные экспериментальные данные по определению эффективности этого сепаратора будут также представлять интерес.

Конструктивные характеристики исследуемых сепараторов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемых жалюзийных сепараторов

№ п/п	Профиль канала жалюзи	Шаг между пластинами t, мм	Тип сепаратора
1	Криволинейный профиль "А" [2]	10	вертикальный
2	Тоже	10	горизонтальный
3	Тоже	10	гравитационно-инерционный
4	Криволинейный профиль "Б" [2]	10	горизонтальный
5	«В»	10,1	вертикальный
6	«Г»	4,2	вертикальный
7	«Д»	3,0	вертикальный
8	«Е»	1,7	вертикальный
9	«В»	10,1	горизонтальный
10	«В»	10,1	Горизонтальный, с перекрышей С = 10 мм
11	«В»	10,1	гравитационно-инерционный
12	«Г»	4,2	гравитационно-инерционный

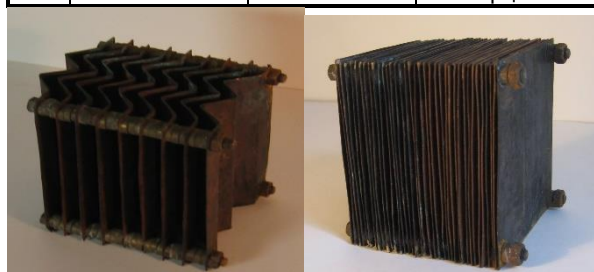


Рис. 2. Исследуемые вертикальные жалюзийные сепараторы № 1 и № 8

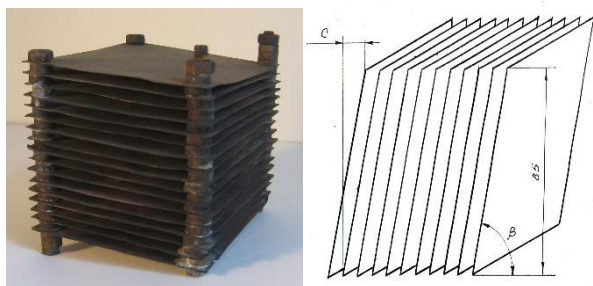


Рис. 3. Исследуемые гравитационно- инерционный и горизонтальный жалюзийные сепараторы из прямых параллельных пластин № 12 и № 10

Сепаратор № 10 представлял собой пакет прямолинейных параллельных пластин, установленных под углом к горизонтали $\beta = 84^\circ$ с перекрышей $C = 10$ мм (рис. 3). Результаты экспериментальных исследований этого каплеуловителя позволят определить во сколько раз снижается величина ω_k после одной ступени сепарации влаги и сделать вывод о выборе минимально-необходимого количества полуоволн для горизонтального жалюзийного сепаратора.

Для анализа результатов исследований эффективности пакетов параллельных пластин использовались также данные полученные ранее для вертикального и горизонтальных жалюзийных каплеуловителей № 1, 2, 4 и ГИС № 3 с традиционными криволинейными профилями канала жалюзи, представленными на рис. 4.

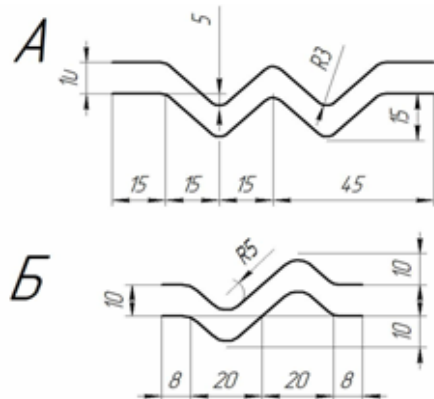


Рис. 4. Геометрические характеристики профилей каналов жалюзийных сепараторов № 1, 2, 3, 4

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследования проводились на барботажном пароводяном стенде, принципиальная схема и конструкция которого приводятся в [7, 8].

Исследуемые вертикальные сепараторы и гравитационно-инерционный сепаратор устанавливались после поворота в сепарационной камере экспериментального стенда на высоте парового объема от «зеркала испарения» $H_{по} = 0,45$ м.

Горизонтальные жалюзийные сепараторы устанавливались в повороте на высоте парового объема $H_{по} = 0,435$ м. Влажность пара на входе в

поворот перед горизонтальным сепаратором ω_p , на входе в вертикальный сепаратор ω_c и после сепараторов, на входе в конденсатор стенда ω_k определялась по формулам

$$\omega_p = \omega_c + \frac{G_p \cdot S_p}{(D + G_p) \cdot S_r} \cdot 100, \%; \quad (1)$$

$$\omega_c = \omega_k + \frac{G_c \cdot S_c}{(D + G_c) \cdot S_r} \cdot 100, \%; \quad (2)$$

$$\omega_k = \frac{S_k}{S_r} \cdot 100, \%; \quad (3)$$

где S_c, S_p соленость проб по иону натрия, отбираемых из ловушек сепарационной камеры и поворота соответственно, мкг/л;

S_k и S_r соленость отобранных проб конденсата и испаряемого рассола по иону натрия, мкг/л;

D производительность стенда по конденсату, кг/ч;

G_c, G_p расход пробы, отбираемой из ловушек камеры и поворота, кг/ч.

Исследования проводились при абсолютных давлениях пара $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа, при постоянной приведенной скорости пара в барботажном испарителе $W_0 = 0,33$ м/с и $1,6$ м/с, соответственно.

Концентрация ионов натрия в анализируемых пробах измерялась пламенным фотометром ПАЖ-2 с пределом обнаружения 2 мкг/л. Действительный, уровень испаряемой воды оставался во всех опытах постоянным и контролировался по иллюминатору испарителя.

В испарителе сечением 230×230 мм на глубине 180 мм от действительного уровня воды устанавливался погруженный дырчатый щит с отверстиями диаметром 5 мм. Живое сечение дырчатого щита $\phi_{отв}$ выбиралось из условия обеспечения устойчивого существования паровой подушки под щитом и изменялось в зависимости от производительности стенда.

При абсолютных давлениях пара в испарителе $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа $\phi_{отв}$ составляло 2,85 % и 5,8 % соответственно. Весовой уровень воды над дырчатым щитом измерялся по водоуказательному стеклу. Обогрев испарителя производился электронагревательными элементами мощностью 50 кВт.

Солесодержание испаряемой воды изменялось в пределах $S_p = (10^3 - 10^5)$ мг/л NaCl, действительный уровень в испарителе поддерживался постоянным, а весовой уровень над погруженным дырчатым щитом изменялся в зависимости от солености в пределах $h_{вес} = (90 - 140)$ мм.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис. 5 представлены экспериментальные данные по уносу влаги до и после пакетов прямых параллельных пластин № 6 и № 12 в зависимости от солености воды при $W_0 = 0,33$ м/с и $P = 0,101$ МПа, с живым сечением погруженного парораспределительного щита $\phi_{отв} = 2,85$ %.

Исследуемые каплеуловители имели одинаковое расстояние между пластинами $t = 4,2$ мм и длину пластин $H = 86$ мм, но разное пространственное расположение: пластины пакета № 8 устанавливались вертикально, а пакет № 14 - по схеме работы ГИС с углом наклона пластин $\gamma = 9^\circ$ для отвода уловленной влаги.

Из рис. 5 видно, что значения ω_k после пакетов прямых параллельных пластин № 8, № 14 в исследуемом диапазоне S_p отличались не более, чем в (1,2-1,3) раза. Полученные опытные данные также позволяют утверждать, что влажность пара после пакета плоских параллельных пластин не зависит от солёности испаряемой воды, если истинный уровень остается неизменным.

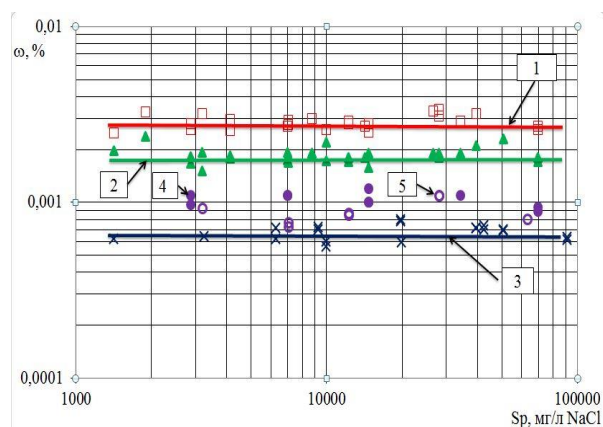


Рис. 5. Влажность пара после сепараторов различного типа в зависимости от солесодержания воды при $P = 0,101$ МПа; $W_c = 3,1$ м/с; $W_0 = 0,33$ м/с: 1 - ω_p , $H_{по} = 0,435$ м; 2 - ω_c ; 3 - вертикальный сепаратор № 1; пакеты прямых параллельных пластин: 4 - вертикальный пакет № 6, 5 - ГИС № 12

Эксперименты подтвердили результаты ранее проведенных исследований влияния S_p на величину конечной влажности пара после вертикальных сеток и жалюзийных сепараторов [9, 10]. На рис. 5 для сопоставления приведены значения ω_k после вертикального жалюзийного сепаратора №1, обладающего криволинейным профилем канала "А" с шагом $t = 10$ мм, исследования которого проводились в аналогичных условиях [9, 10]. Скорость пара в проходном сечении всех трех сепараторов была примерно одинакова. Как показали исследования, влажность после вертикального жалюзийного сепаратора №1, была ниже в (1,5÷1,8) раза по сравнению с пакетами № 6, № 12, несмотря на то, что шаг между пластинами жалюзи у этого каплеуловителя был в 2,4 раза больше.

На рис. 6 представлены результаты экспериментального исследования эффективности сепараторов № 5, 9, 11, собранных из прямолинейных параллельных пластин, в зависимости от скорости пара W_c и способа установки пакета пластин в паровом объеме стенда, полученных на соленой воде при $t_s = 60$ °С, $W_0 = 1,6$ м/с.

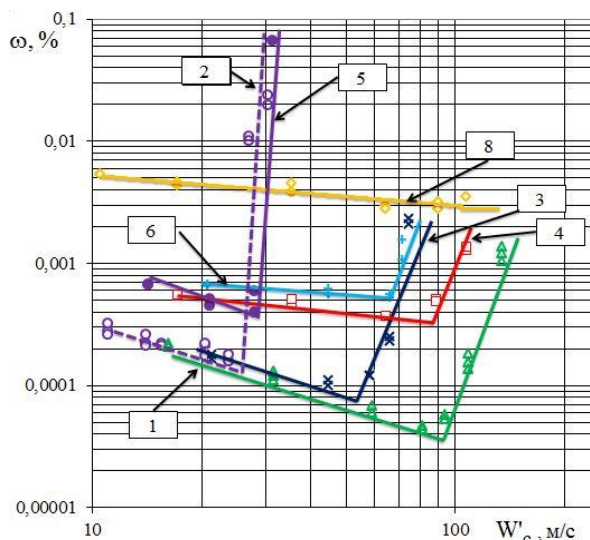


Рис. 6. Влажность пара после сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и способа установки пакета пластин в паровом объеме стенда при $P = 0,0199$ МПа; $W_0 = 1,6$ м/с: 1, 2, 3 - жалюзийные сепараторы: № 1, 2, ГИС № 3; 4, 5 - пакеты параллельных пластин: № 5, 9; 6 - ГИС № 11; 8 - ω_c

На основании рис.6 можно утверждать, что конечная влажность после всех трех пакетов, установленных по схемам работы вертикального, горизонтального и гравитационно-инерционного сепараторов, оказалась примерно одинаковой.

Критическая скорость вертикального сепаратора № 5 превосходила значения $W_{кр}$ для горизонтального сепаратора № 9 и ГИС № 11 с $\gamma = 9^\circ$. На этом рисунке показаны также зависимости $\omega_k = f(W_c)$ для ГИС № 3, вертикального и горизонтального жалюзийных каплеуловителей № 1, 2 с традиционным криволинейным профилем канала "А", полученные при тех же условиях работы. Все шесть сепараторов имели одинаковый шаг $t = 10$ мм. Из сопоставления характеристик $\omega_k = f(W_c)$, показанных на рис. 6, видно, что значения конечной влажности после жалюзийных сепараторов № 1, 2, 3 оказались в (2,8-7,0) раз ниже, чем после пакетов № 5, 9, 6 с аналогичным способом установки в паровом объеме стенда, что можно объяснить отсутствием перекрытия пластин в профиле "Г", а также наличием значительного сепарационного эффекта, вызываемого в криволинейном канале действием центробежной силы.

Как показали визуальные наблюдения, через горизонтальный пакет параллельных пластин № 2, пролетали даже отдельные крупные капли. Поэтому с увеличением скорости набегающего потока пара W_c эффективность осаждения влаги в пакетах прямых параллельных пластин возрастала гораздо слабее, чем в жалюзийных сепараторах.

Влияние перекрытия на эффективность сепарации капель в горизонтальном пакете прямых параллельных пластин № 10 с профилем "Г" показана на рис. 7.

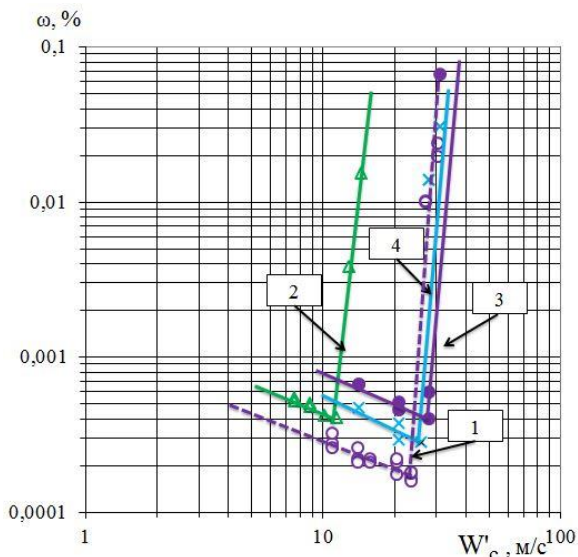


Рис. 7. Влажность пара после горизонтальных сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и перекрытия пластин С при $P = 0,0199$ МПа; $W_0 = 1,6$ м/с:
1, 2 - жалюзийные сепараторы: № 2, 4;
3, 4 - пакеты параллельных пластин: № 9, 10

При значении $C = 10$ мм величина ω_k после пакета № 10 по сравнению с пакетом пластин № 11 снизилась примерно в 1,5 раза. Влажность пара на входе в горизонтальные сепараторы составляла $\omega_p = (0,120-0,137)$ %. Конечная влажность пара уже после первого поворота потока пара была меньше величины ω_p в (22,0-27,5) раза. Однако эффективность горизонтального сепаратора № 2 с криволинейным профилем канала «А», характеристика которого показана на рис. 7, оставалась по-прежнему выше приблизительно в 2 раза.

На этом рисунке показана также зависимость $\omega_k = f(W'_c)$ для горизонтального жалюзийного каплеуловителя № 4 с криволинейным профилем канала «Б». Увеличение перекрыши в горизонтальном сепараторе до $C = 10$ мм уже не приводило к дальнейшему уменьшению конечной влажности, а сопровождалось снижением критической скорости пара в сепараторе.

По данным, приведенным на рис. 6, 7 можно установить, что значения критической скорости потока пара для сепараторов с криволинейным и прямолинейным профилями каналов, имеющими одинаковое расположение в пространстве (№ 1 и 5; № 2 и 9; № 3 и 11), отличаются не более, чем на (5-7) м/с. Критическая скорость пара в жалюзийных сепараторах и в пакетах параллельных пластин с шагом $t = 10$ мм при одинаковых условиях работы определялась способом дренажа уловленной жидкости.

Результаты экспериментальных исследований вертикальных пакетов прямых параллельных пластин № 5-8 с различной величиной шага t , представленные на рисунках 8, 9, подтвердили существующее предположение о влиянии расстояния между пластинами на значения конечной влажности ω_k и критической скорости пара в сепараторе.

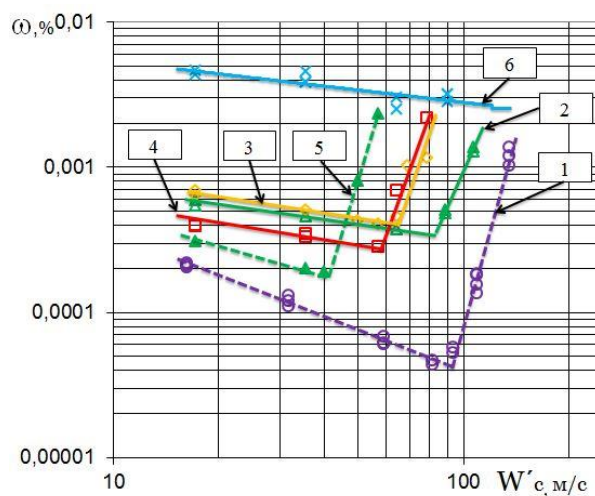


Рис. 8. Влажность пара после вертикальных сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и шага при $P = 0,0199$ МПа,

$W_0 = 1,6$ м/с: 1 - жалюзийный сепаратор № 1; 2, 3, 4, 5 - пакеты параллельных пластин № 7, 8, 9, 10; 6 - влажность пара на входе в сепараторы
Уменьшение величины t с 10,1 мм до 4,2 мм не отразилось на значениях ω_k , что, вероятно, можно объяснить малыми размерами пролетающих через сепаратор капель, из которых состоит транспортируемый унос после поворота. Дальнейшее уменьшение расстояния между пластинами до $t = 3,0$ мм и $t = 1,7$ мм сопровождалось снижением ω_k в (1,5-2,5) раза. Однако, как видно из рис. 8, эффективность горизонтального сепаратора № 1 с криволинейным профилем канала «А» оставалась по-прежнему выше в (1,5-1,8) раза.

Величина шага оказывала влияние также и на критическую скорость пара в сепараторе. Уменьшение расстояния между пластинами с 10,1 мм до 1,7 мм приводило к снижению $W_{кр}$ в вертикальных пакетах пластин примерно в (1,8-2,0) раза.

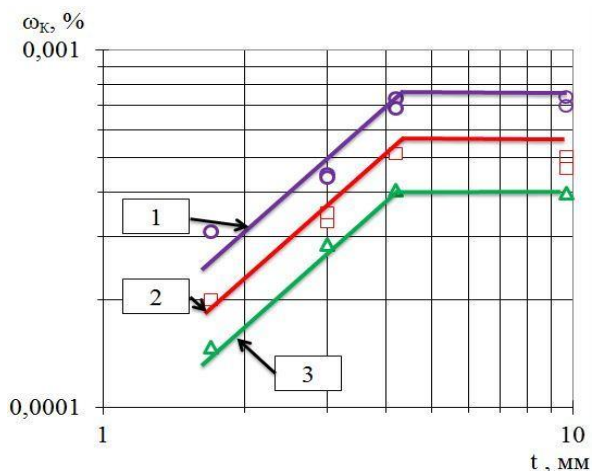


Рис. 9. Зависимость влажности пара после вертикального пакета прямых параллельных пластин от расстояния между пластинами t при $P = 0,0199$ МПа; $W_0 = 1,6$ м/с:
 1 - $W_c = 17,2$ м/с; 2 - $W_c = 35,5$ м/с; 3 - $W_c = 57,3$ м/с

Коэффициенты очистки пара в вертикальном пакете параллельных пластин № 5 и вертикальном жалюзийном сепараторе №1 с шагом 10 мм составляли $K_{оч} = (8-10)$ и $K_{оч} = (23-73)$ соответственно (рис. 8). Установка в повороте горизонтального сепаратора № 9 ($t = 10,1$ мм) привела к увеличению величины общего коэффициента очистки пакета пластин № 9 и поворота до $K_{оч} = (187-300)$. Установка традиционного горизонтального жалюзийного сепаратора № 2 давала снижение влажности пара в (428 -750) раз (рис. 6, 7).

По мнению ряда авторов, эффективность улавливания капель в пакете прямых параллельных

пластин может определяться инерционным захватом плоских пластин, диффузионным осаждением мелких капель в пристеночной области, эффектом зацепления капель при обтекании пластины, уменьшением турбулентности и транспортирующей способности потока пара в каналах сепаратора [2, 3]. Общий суммарный эффект очистки пара вследствие действия предполагаемых механизмов осаждения капель в пакете параллельных пластин оказывается достаточно существенным.

Сравнение, полученных экспериментальным путём, значений влажности пара после вертикальных и горизонтальных жалюзийных сепараторов с экспериментальными данными работ [5, 6] при $P = 0,101$ МПа показывает их удовлетворительную сходимость.

Заключение

На пакетах прямых параллельных пластин показано, что уменьшение расстояния между пластинами, приводит к уменьшению конечной влажности после вертикального сепаратора и к одновременному снижению величины критической скорости пара в сепараторе.

На горизонтальном пакете прямых параллельных пластин с перекрытием канала 10 мм в условиях вакуума установлено значительное снижение начальной влажности пара уже после первого поворота потока пара.

Показано, что критическая скорость пара в жалюзийных сепараторах и в пакетах параллельных пластин при одинаковых режимных условиях определяется способом дренажа уловленной жидкости и зависит от влажности пара на входе в сепаратор.

Литература

1. M. H. Hamed Estakharsar, R. Rafee. Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels. Applied Mathematical Modelling. 2016. № 1, V. 40. Pp. 685-699.
2. G. Venkatesan, N. Kulasekharan, S. Iniyan. Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization. Desalination. 2015. № 8, V. 370. Pp. 33-43.
3. G. Venkatesan, N. Kulasekharan, S. Iniyan. Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis. Desalination. 2014. № 12, V. 354. Pp. 39-52.
4. Ebrahim A. Hawaid, Iqbal M. Mujtaba. Effect of Demister Separation Efficiency on the Freshwater Purity in MSF Desalination Process. Computer Aided Chemical Engineering. 2011. V. 29. Pp. 1180-1184.
5. Девянин В.А. Выбор оптимальных условий работы жалюзийных сепараторов для парогенерирующих установок ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 20 с.
6. Рафаелян А.В. Повышение эффективности сепарирующих устройств аппаратов барботажного типа ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 18 с.
7. Филонов А.Г. Экспериментальное исследование влияния солесодержания испаряемой воды на влажность пара при барботажном кипении // Известия Калининградского государственного технического университета. – Кал-д: КГТУ, 2011. № 21. С. 121-126.
8. Филонов А.Г., Архипов М.И. Методика исследования эффективности паросепарационных устройств судовых паровых котлов и опреснительных установок // Материалы IV Международного Балтийского морского форума. - Кал-д: КГТУ, 2016. С.363-368.
9. Архипов М.И., Филонов А.Г. Исследование эффективности вертикальных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей // Морские интеллектуальные технологии. 2017, № 3 (37). Т.1. С.74-79.
10. Архипов М.И., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование влияния геометрических характеристик профиля канала жалюзи на эффективность очистки вторичного пара в сепараторах судовых опреснителей // Морские интеллектуальные технологии, 2017. Т.2. № 4 (38). С.93-99.

References

1. M. H. Hamed Estakharsar, R. Rafee. Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels. Applied Mathematical Modelling. 2016. № 1, V. 40. Pp. 685-699.

2. G. Venkatesan, N. Kulasekharan, S. Iniyan. Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization. *Desalination*. 2015. № 8, V. 370. Pp. 33-43.
3. G. Venkatesan, N. Kulasekharan, S. Iniyan. Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis. *Desalination*. 2014. № 12, V. 354. Pp. 39-52.
4. Ebrahim A. Hawaid, Iqbal M. Mujtaba. Effect of Demister Separation Efficiency on the Freshwater Purity in MSF Desalination Process. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2011. V. 29. Pp. 1180-1184.
5. Devyanin V.A. Vybór optimal'nykh usloviy raboty zhalyuziynykh separatorov dlya parogeneriruyushchikh ustanovok TES i AES. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1985. 20 p. (In Russian)
6. Rfaelyan A.V. Povyshenie effektivnosti separiruyushchikh ustroystv apparatov barbotazhnogo tipa TES i AES. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1989. 18 p (In Russian).
7. Filonov A.G. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya solesoderzhaniya isparyaemoy vody na vlazhnost' para pri barbotazhnom kipeanii. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Kaliningrad State Technical University News]*. 2011. № 21. Pp. 121-126 (In Russian).
8. Filonov A.G., Arkhipov M.I. Materialy IV Mezhdunarodnogo Baltiyskogo Morskogo Forumá "Metodika issledovaniya effektivnosti paroseparatsionnykh ustroystv sudovykh parovykh kotlov i opresnitel'nykh ustanovok". Kaliningrad, 2016. Pp.363-368 (In Russian)
9. Arkhipov M.I., Filonov A.G. Issledovanie effektivnosti vertikal'nykh separatorov para sudovykh distillyatsionnykh opresniteley. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017, N 3 (37), V1, Pp. 74-79 (In Russian).
10. Arkhipov M.I., Filonov A.G. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya geometricheskikh karakteristik profilya kanala zhalyuzi na effektivnost' ochistki vtorichnogo para v separatorah sudovykh opresniteley. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, № 4 (38), V .2. Pp. 93-99 (In Russian).

УДК 629.5

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА БАЛАНСА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

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

Максим Сергеевич Харитонов

Кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1

Роман Олегович Брижак

аспирант кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1

Аннотация

Вопросам оценки баланса реактивной мощности на судах уделяется недостаточное внимание как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. Так, при использовании табличного метода при расчете мощности судовой электростанции для ряда судов не составляется баланс реактивной мощности, или некорректно рассчитывается потребляемая реактивная мощность при заданном коэффициенте загрузки традиционных электроприемников: асинхронных электроприводов и трансформаторов. При этом наблюдается рост реактивных потоков в судовых электроэнергетических системах. Это обусловлено широким внедрением энергосберегающего освещения и силовой полупроводниковой техники. Рост реактивных нагрузок приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению срока службы электрооборудования. В работе приведена уточняющая методика расчета потребления реактивной мощности асинхронных электродвигателей, трансформаторов и полупроводниковых преобразователей. Впервые, на основании экспериментальных исследований, приведены данные о потреблении реактивной мощности энергосберегающими лампами, контакторами. Полученные результаты будут полезны при составлении баланса реактивной мощности в судовых электроэнергетических системах на стадии их проектирования.

Ключевые слова: Активная мощность, реактивная мощность, баланс мощностей, судовая электроэнергетическая система.

A REFINED APPROACH (METHODOLOGY) FOR THE SHIP ELECTRIC POWER PLANT REACTIVE POWER BALANCE CALCULATION

Valeriy F. Beley

DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Maksim S. Kharitonov

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

Roman O. Brizhak

Postgraduate Student at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

Abstract

The issues of reactive power balance of vessels are given insufficient attention during both the design and operation. For some vessels, calculation of shipboard electric power plant with the tabular method is done without evaluation of the reactive power balance. Furthermore reactive power consumption can be incorrectly calculated based on the load factor of conventional electrical equipment: induction motors and transformers. At the same time, there is an increase in reactive flows in shipboard power systems caused by the large-scale implementation of energy efficient lighting and

power semiconductor technologies. The growth of reactive loads leads to an increase in energy losses and reduction of electrical equipment service life. The paper presents a refined approach for reactive power consumption calculation of induction motors, transformers and semiconductor converters. For the first time ever, the data on reactive power consumption of energy-saving lamps and contactors has been presented on the basis of experimental studies. The obtained results will be useful for the reactive power balance calculation during the design of shipboard electric power systems.

Key words: Active power, reactive power, power balance, shipboard electric power system.

Введение

Вопросам оценки баланса реактивной мощности на судах уделяется недостаточное внимание как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации, что приводит к дополнительным потерям энергии, снижению срока службы электрооборудования. В то же время на судах широкое применение получили частотные электроприводы и энергосберегающие светильники с высоким потреблением реактивной мощности, что, как правило, не учитывается в достаточной степени при расчете баланса реактивной мощности.

1. Анализ баланса реактивной мощности судовых энергетических систем

В судовых электроэнергетических системах (ЭЭС) в виду их автономности имеет место равенство генерируемой ΣQ_r и потребляемой ΣQ_n реактивных мощностей (РМ) (1).

$$\Sigma Q_r = \Sigma Q_n \tag{1}$$

Анализ номенклатуры и характеристик судового электрооборудования показывает, что основными источниками РМ являются синхронные машины и конденсаторные батареи. К потребителям РМ относятся: асинхронные электродвигатели (ЭД), трансформаторы, энергосберегающие лампы,

полупроводниковые преобразователи, магнитные пускатели и др. Сопоставляя на примере нагрузок валогенератора судна типа РТМС (рис.1), паспортный (табл.1) [1] и фактический при работе на промысле (табл. 2) балансы РМ, можно констатировать, что экспериментальные данные по балансу РМ при работе валогенератора и орудий лова на судах типа РТМС (табл. 2) свидетельствуют о более низких значениях $\cos\phi$, чем представлены в энергобалансе нагрузок валогенератора (табл. 1).

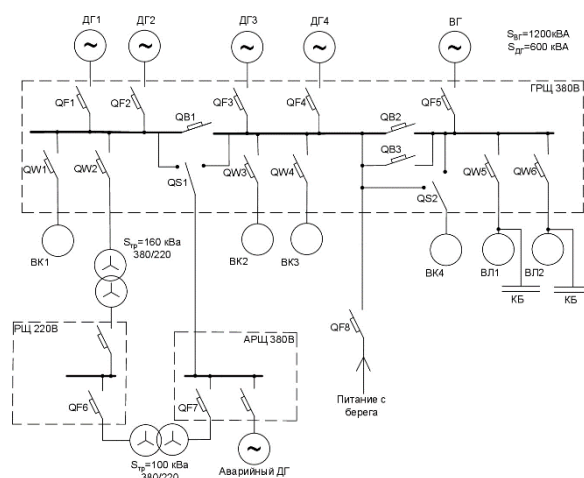


Рис. 1. Упрощенная схема электроэнергетической системы судна типа РТМС

Таблица 1

Энергобаланс нагрузок валогенератора судов типа РТМС

Наименование электропривода	n	Pн, кВт	ηи, %	Ход судна с тралом				Подъем трала			
				K ₀	K _и	P, кВт	Q, квар	K ₀	K _и	P, кВт	Q, квар
ЭД гидроагрегата траловой лебедки	2	235	93	1	0,16	81	306	1	0.9	455	380
ЭД комбинированного вспомогательного насоса	2	14	87	0,5	0,8	13	6	0,5	0.8	13	6
ЭД кабельной лебедки	4	31/82/60	85	0,5	0,2	28,2	45	0,5	0,2	28,2	45
ЭД гиневой лебедки	2	31/86/60	85	-	-	-	-	1	0,2	28,2	45
Управление	1	6	-	-	-	6	-	-	-	6	-
Всего	12			cosφ=0,34		128,2	357	cosφ=0,74		530,4	476

Таблица 2

Данные о работе валогенератора и орудий лова для ряда судов на промысле при тралении

Судно	Работа с орудиями				Работа валогенератора			
	Операция	Длительность, мин	Скорость траления, м/с	Улов, т	I, А	U, В	P, кВт	cosφ
Куршская коса	Ход с тралом	115	5		750	390	100	0,2
	Подъем трала	23-10-23-50		10	1100	-	300	0,404
Тритон	Ход с тралом	105	5,5		700	310	100	0,212
	Подъем трала	02-30-03-20		6	900	390	300	0,494
Русское поле	Ход с тралом	180	5,5		850	390	150	0,28
	Подъем трала	04-55-05-55		5	1000	390	300	0,445

Работа судовых синхронных генераторов при более низком cosφ, приводит к увеличению электрических потерь (2) в обмотках статора и возбуждения (рис. 2).

$$\Delta P_{CR} = m_1(I_{CR1}^2 - I_{CR2}^2)R_{CR} + (I_{f1}U_{f1} - I_{f2}U_{f2}) \quad (2)$$

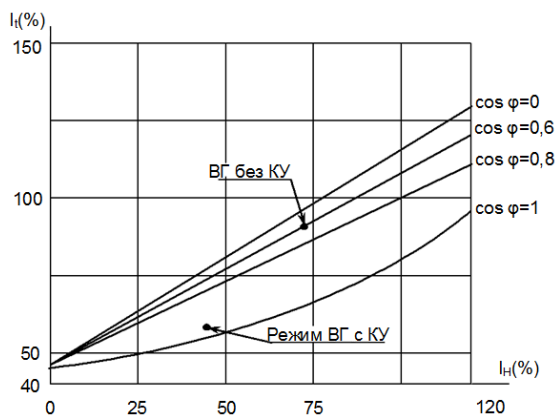


Рис. 2. Регулировочная характеристика валогенератора судна типа РТМС

Анализ представленных данных свидетельствует о необходимости уточнения расчета величины РМ, потребляемой асинхронными электроприводами. Следует отметить, что каждый электропривод при работе подключен к сети через контактор, который также потребляет РМ. Кроме того, на современных судах широко внедряется частотные электроприводы, люминесцентные и светодиодные светильники, данные о потребляемой РМ для которых, как правило, отсутствуют.

2. Исследование реактивной мощности судовых электроприемников

2.1. Асинхронные электроприводы

Реактивная мощность, потребляемая асинхронными электроприводами при различных режимах эксплуатации может быть рассчитана с учетом рабочих характеристик асинхронного электродвигателя (рис. 3) по выражению (3) или на основе каталожных данных [2].

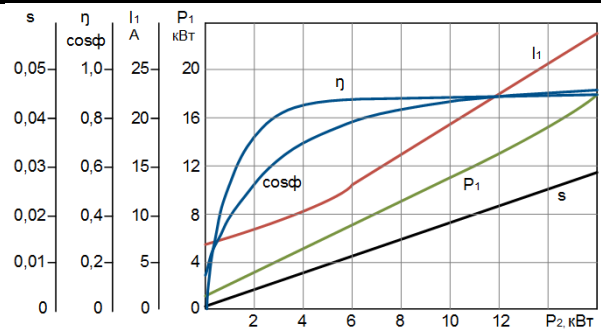


Рис. 3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

$$Q_1 = \frac{K_3 \cdot P_{2H}}{\eta_H} \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

где Q_1 – потребляемая асинхронным электродвигателем РМ при заданном коэффициенте загрузки K_3 и коэффициенте полезного действия η_1 .

Расчет РМ по каталожным данным проводится по выражениям (4-7) [2].

$$Q_0 = 3I_{00}^2 \cdot X_{\mu}''; \quad Q_{\delta 1} + Q_{\delta 2} = 3(I_2'')^2 \cdot X_k \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_0 + Q_{\delta 1} + Q_{\delta 2} \quad (5)$$

$$I_{00} = \frac{U_1}{R_m + jX_m} = const \quad (6)$$

$$-I_2' = \frac{U_1}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2} * \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) - jX_k \right] \quad (7)$$

Коэффициент загрузки (K_3) асинхронного электродвигателя равный единице имеет место при номинальном скольжении $s_{НОМ}$ (8), а долевые значения (s) вычисляются в прямо пропорциональной зависимости от коэффициента загрузки асинхронного двигателя (рис. 3) с учетом $s_{НОМ}$ (8).

$$S_{НОМ} = \frac{n_1 - n_{НОМ}}{n_1}; \quad S = S_{НОМ} \cdot K_3 \quad (8)$$

где, n_1 и $n_{НОМ}$ – соответственно синхронная и номинальная скорости вращения электродвигателя.

2.2. Магнитные пускатели

Магнитные пускатели и контакторы широко используются в судовых ЭЭС для дистанционного пуска, остановки и реверсирования асинхронных электродвигателей. Потребление РМ электромагнитными катушками пускателей возможно оценить на примере экспериментальных исследований пускателей ПМЕ-211 (рис. 5). Данные пускатели являются неревесивными без теплового реле с номинальным током 25А (второй габарит). Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований пускателей ПМЕ-211

Параметр	Образец 1	Образец 2	Образец 3
U, В	220	220	220
I, А	0,0873	0,1157	0,0907
P, Вт	5,66	6,51	6,2
S, ВА	19,64	26,08	20,57
Q, вар	18,78	25,27	19,6
cosφ	0,29	0,25	0,3
K _{ИΣ}	6,7	4,9	6,5

В табл. 3 также приведены данные по несинусоидальности тока, потребляемого катушками магнитных пускателей. Анализ данных табл. 3 свидетельствует о низком cosφ и значительном потреблении РМ пускателями. Следует отметить, что с повышением габарита пускателя, увеличивается мощность электромагнитной катушки и, как следствие, потребление РМ. Кроме того, при эксплуатации в условиях морского климата возможно развитие коррозии на магнитопроводе, что приводит к увеличению магнитного зазора и росту потребления РМ. На рис. 4 представлены результаты анализа энергопотребления пускателем в момент подключения к судовой сети.

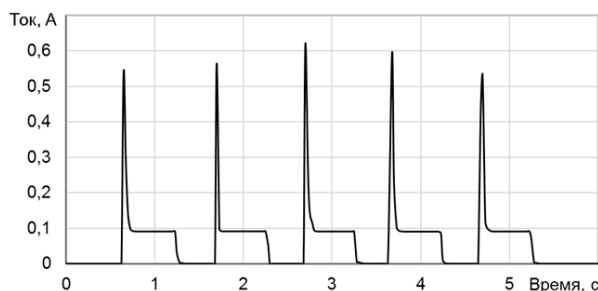


Рис. 4. Величина бросков тока при включении пускателя по отношению к рабочему току

Анализ данных рис. 6 свидетельствует о значительной величине броска тока в цепи электромагнитной катушки при включении пускателей, который имеет значительную реактивную составляющую с учетом разомкнутого состояния магнитопровода в начальный момент времени.

2.3. Трансформаторы

Реактивная мощность, потребляемая трансформатором в судовой ЭЭС (Q_T), в упрощенном виде может быть представлена тремя составляющими: Q_{μ} - реактивная мощность, определяющая создание основного магнитного потока; $Q_{\delta 1}$ - реактивная мощность, обусловленная потоком рассеяния, сцепленного с первичной обмоткой; $Q_{\delta 2}$ - реактивная мощность, обусловленная потоком рассеяния, сцепленного со вторичной обмоткой [2]. С учетом схемы замещения РМ трансформатора определяется по выражению (9).

$$Q_T = Q_{\mu} + Q_{\delta 1} + Q_{\delta 2} = mI_{\mu}^2 X_{\mu} + mI_1^2 X_1 + m(I_2')^2 X_2' \quad (9)$$

При увеличении нагрузки, увеличиваются токи в первичной и вторичной обмотке I_1 и I_2 , и как следствие $Q_{\delta 1}$ и $Q_{\delta 2}$ возрастают, а составляющая Q_{μ} практически не изменяется. Чем больше токи, тем больше падение напряжения на сопротивлениях обмоток трансформаторов, а, следовательно, меньше напряжение вторичной обмотки U_2 .

2.4. Осветительные установки

Используемые для нужд освещения лампы накаливания не потребляют РМ. Широко внедряемые на судах осветительные установки на основе люминесцентных и светодиодных ламп являются потребителями РМ, а в ряде случаев потребление РМ для данных изделий может превышать потребление активной мощности (табл. 4, табл. 5) [3].

Таблица 4

Зависимость реактивной мощности люминесцентной лампы Ecotone Ambione от величины подводимого напряжения

Параметры	Напряжение, В		
	198	220	242
I, А	0,132	0,18	0,23
P, Вт	17	21	26
Q, вар	17,1	33,6	49,2
cosφ	0,65	0,53	0,47

Таблица 5

Потребление реактивной мощности СД лампами различных производителей

Лампа	U, В	I, мА	P, Вт	Q, вар	cosφ _{экв}
Ikea	230	32	5,9	4,4	0,8
ISY	230	26	3,2	4,9	0,54
Osram	230	36	7,7	3,1	0,93
Philips	230	32	3,2	6,6	0,44
Philips	230	35	5,9	5,6	0,72
Philips	230	83	10,8	15,2	0,58
Xavax	230	49	9,4	6,3	0,83

2.5. Полупроводниковые преобразователи

Наиболее мощными электроприводами на судах рыбопромыслового флота, работающими от судовой сети через полупроводниковый преобразователь, являются электроприводы ваерных лебедок. Рассмотрим, на примере судна проекта 488 (рис. 5), потребление реактивной мощности этим электроприводом. Следует отметить, что шестифазная схема преобразователя нашла наибольшее распространение на судах.

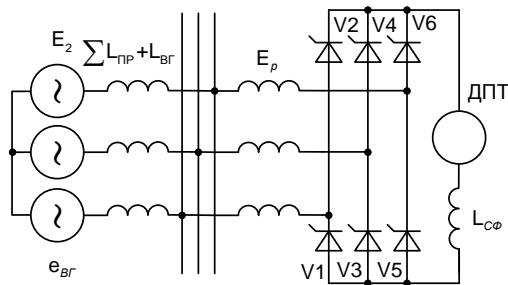


Рис. 5. Эквивалентная схема одномотового преобразователя, работающего в выпрямительном режиме

Расчет РМ (Q_1), потребляемой преобразователем по первой гармонике, производится по выражениям (10-12). Угол коммутации (γ) определяется по выражению (13).

$$Q_1 \approx 3 \cdot E_\phi \cdot I_{1(1)} \sin \phi_1 \quad (10)$$

$$I_{1(1)} = 0,96I_d; I_1 = 0,82I_d \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \phi_1 = \frac{\gamma - \cos(2\alpha + \gamma) \cdot \sin \gamma}{\sin(2\alpha + \gamma) \sin \gamma} \quad (12)$$

$$\cos \alpha - \cos(\gamma + \alpha) = \frac{2I_d \cdot 2\pi f_{сему} \cdot (L_{вг} + L_{к} + \Sigma L_{тр})}{\sqrt{6} \cdot E_\phi} \quad (13)$$

где $I_{1(1)}$ – первая гармоника входного тока (I_1) преобразователя; E_ϕ – фазное напряжение источника; где I_d – ток нагрузки; x_ϕ – индуктивное сопротивление коммутирующей фазы.

При расчетах РМ первой гармонике тока принимается допущение, что к валогенератору не подключены другие нагрузки. В этом случае при

работе ваерной лебедки на главном распределительном щите имеют место наибольшие искажения напряжения. При работе шестифазного преобразователя из сети потребляется первая и эмиссируется ряд высших гармоник тока (16).

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{I_5}{I_{1(1)}} \cos 5\omega t + \frac{I_7}{I_{1(1)}} \cos 7\omega t - \frac{I_{11}}{I_{1(1)}} \cos 11\omega t + \frac{I_{13}}{I_{1(1)}} \cos 13\omega t - \dots \right) \quad (16)$$

В выражении (16) приведены только наиболее значимые из эмиссируемых преобразователем высшие гармоники: от пятой по тринадцатую. При $\gamma=0$ амплитуда высших гармоник тока зависит только от номера гармоники. При увеличении угла коммутации $\gamma>0$ амплитуда высших гармоник тока зависит от углов управления и коммутации.

Заключение

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил выявить основные особенности составления баланса реактивной мощности для судовых ЭЭС. На основе анализа полученных результатов исследования баланса реактивной мощности ЭЭС ряда судов выявлено, что уровень потоков реактивных мощностей превышает расчетные значения. С учетом специфики судовых ЭЭС приведены уточняющие выражения для расчета потребления реактивной мощности трансформаторов, асинхронных двигателей от коэффициента загрузки, что имеет особое значение для электроприводов промысловых судов, работающих с переменной нагрузкой. Впервые, на основании экспериментальных исследований, приведены данные о потреблении реактивной мощности энергосберегающими лампами, контакторами.

Полученные результаты и методика исследования реактивных мощностей электроприемников будут полезны при составлении баланса реактивной мощности в судовых электроэнергетических системах на стадии их проектирования.

Литература

1. Панов В.А. Судовые электростанции и расчет их мощности. Л.: Судостроение, 1965.132с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрически машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. СПб.: Питер,2008. 350 с.; ил.
3. Белей, В.Ф. Био и электромагнитная совместимость судовых систем освещения на основе светодиодных источников света / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37).
4. Качество электроэнергии на судах: Справочник/ В.В. Шейнихович[и др.]. Л.: Судостроение, 1988. 180 с.

References

1. Panov V.A. Sudovye elektrostantsii i raschet ikh moshchnosti. L.: Sudostroenie, 1965. 132 p.
2. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheski mashiny. Mashiny peremennogo toka: Uchebnik dlya vuzov. SPb.: Piter,2008. 350 p.; il.
3. Beley, V.F. Bio i elektromagnitnaya sovmestimost' sudovykh sistem osveshcheniya na osnove svetodiodnykh istochnikov sveta. V.F. Beley, M.S. Kharitonov. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. №3(37).
4. Kachestvo elektroenergii na sudakh: Spravochnik. V.V. Sheynikhovich[i dr.] L.: Sudostroenie, 1988. 180 GOST R 54945-2012. Zdaniya i sooruzheniya. Metody izmereniya koeffitsienta pul'satsii osveshchennosti.

УДК 621.431.74

ФОРМИРОВАНИЕ КОСВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ СУДОВЫХ ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Леонид Игнатьевич Ковальчук

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Марина Васильевна Исаева

старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Аннотация

В тепловом балансе двигателей потери с отработавшими газами являются основными, поскольку достигают 35-40% от теплоты, выделившейся в цилиндрах. На основе элементарных физических представлений о процессах теплообмена для определения этих потерь может быть составлена простая зависимость, которая используется в процессе стендовых испытаний дизелей. Применение этой зависимости не связывает потери с отработавшими газами с параметрами двигателей доступными для оперативного контроля в судовых условиях.

По этой причине в статье предложены косвенные зависимости для оценки относительных тепловых потерь с отработавшими газами современных четырехтактных двигателей, в которых эти зависимости выражены в функции от температуры отработавших газов и частоты вращения коленчатого вала, т.е. параметров доступных для оперативного контроля в судовых условиях. Показано, что эти зависимости обладают значительной универсальностью и достаточной для решения практических задач точностью.

Ключевые слова: судовые четырехтактные двигатели, тепловые потери с отработавшими газами, косвенные зависимости

FORMATION OF INDIRECT DEPENDENCES FOR DETERMINATION OF HEAT LOSSES WITH EXHAUST FUMES OF SHIP FOUR-CYCLE ENGINES

Leonid I. Kovalchuk

DSc in Engineering, Professor at the Department of Motor Transport and Automobile Service
Baltic Fishing Fleet State Academy
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Marina V. Isaeva

Senior Lecturer at the Department of Motor Transport and Automobile Service
Baltic Fishing Fleet State Academy
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Abstract

In the thermal balance of engines, losses with exhaust fumes are major, since they reach 35–40% of the heat released in the cylinders. On the basis of elementary physical concepts of heat exchange processes, a simple relationship can be made up to determine these losses, which is used in the process of diesel engine rig tests. Application of this dependence does not associate losses with exhaust fumes with the parameters of engines available for operational control in ship conditions.

For this reason, the article proposes indirect dependencies for estimating the relative heat loss with the exhaust fumes of modern four-stroke engines, in which these dependences are expressed as a function of the exhaust gas temperature and the crankshaft speed, i.e. parameters available for operational control in ship conditions. It is shown that these dependences are considerably versatile and are sufficient for solving practical problems.

Key words: ship four-cycle engines, heat losses with exhaust fumes, indirect dependencies

Введение

В статье решается задача, когда заведомо известно, что определение параметров косвенных зависимостей производится в условиях задания исходных данных с погрешностями, то есть результат вычислений в этих условиях будет найден приближенно. Суммарная погрешность результата расчета будет состоять из вычислительной и неустраняемой погрешности [6].

Вычислительная погрешность – погрешность от округлений, зависит в основном от выбранной схемы вычислений, т.е. от выбранного метода решения задачи. При одном методе решения эта погрешность будет меньше, при другом – больше. Именно поэтому возникает вопрос о качестве практических методов расчета параметров многофакторных моделей в тех случаях, когда решение одной и той же задачи может быть дано не одним, а несколькими методами.

Неустраняемая погрешность зависит от содержания задачи и характеризуется ее обусловленностью. Задача считается плохообусловленной, если результат решения меняется при незначительном изменении исходных данных. При приближенной постановке вычислительной задачи в ее решении всегда имеется неопределенность в исходных данных. По этой причине возникает вопрос, какой из численных методов для практических расчетов предпочтительнее. Надежность является важнейшим из критериев оценки качества численного метода: метод считается надежным, если при его применении решения получаются с погрешностью, не превосходящей существенно погрешности, обусловленной неопределённостью исходных данных.

Основная часть

Известно, что в практике для количественного описания многофакторных процессов используются зависимости степенного и регрессионного вида. В качестве примера рассмотрим процесс определения параметров моделей, описывающих тепловые потери с отработавшими газами в судовых четырехтактных двигателях в зависимости от температуры отработавших газов за газовой турбиной и частоты вращения коленчатого вала двигателя. Предположительно взаимосвязь между названными параметрами зададим в виде:

$$1 - q_r = tg_2^{1-q_r} \cdot n^{x_n} \tag{1}$$

где q_r – относительная величина потерь с отработавшими газами;

tg_2 – температура отработавших газов за газовой турбиной или в выпускном коллекторе для двигателей без наддува, °C;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹.

В этом случае в рассмотрение вводится степенной комплекс с переменными показателями степени.

Суть замысла сводится к тому, что если перечень определяющих факторов, стоящих в правой части, выбран правильно, то равенство левой и правой частей представления (1) должно

достигаться посредством изменения показателя степени x_n по определенной закономерности в функции от tg_2 или n .

Для определения этой закономерности, логарифмируем представление (1):

$$\ln(1 - q_r) = (1 - q_r) \cdot \ln(tg_2) + x_n \cdot \ln(n) \tag{2}$$

откуда

$$x_n = \frac{\ln(1 - q_r) - (1 - q_r) \cdot \ln(tg_2)}{\ln(n)} \tag{3}$$

Вычисления x_n произведены по опытным данным, заимствованным из [4]. На рис. 1 приведены результаты вычислений в координатной системе $x_n = f(\ln(n))$.

Если учесть, что численные значения параметров q_r и tg_2 заданы приближенно, то по расположению точек на рис.1 и величине разброса можно сделать заключение о том, что зависимость $x_n = f(n)$ является не случайной. Уравнение, аппроксимирующее эту зависимость, имеет вид $x_n = -0,0251 (\ln(n))^2 + 0,4569 \ln(n) - 2,6032$ (4) и может быть использовано при решении уравнения (2).

При заданных значениях tg_2 и n тепловые потери с отработавшими газами q_r по уравнению (2) можно определить только методом последовательных приближений.

Для сравнительной оценки влияния на достоверность определения q_r различными методами, разложим логарифмическую функцию левой части (2) в степенной ряд

$$\ln(1 - q_r) = -q_r - \frac{q_r^2}{2} - \frac{q_r^3}{3} - \frac{q_r^4}{4} - \dots \tag{5}$$

Максимальные значения относительной величины потерь с отработавшими газами для современных судовых дизелей не превышают 0,40.

При $q_r = 0,40$ значение функции $\ln(1 - 0,40) = -0,5108$. Сумма первых трех слагаемых разложения (5) равна - 0,5013, а четырех -0,5077. Следовательно, при удержании в разложении первых трех слагаемых погрешность равна около 2%, а четырех менее 1%.

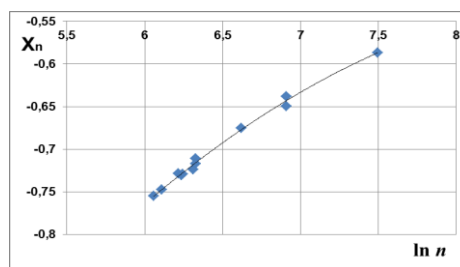


Рис. 1. Результаты вычислений в координатной системе $x_n = f(n)$

С учетом изложенных соображений после замены $\ln(1-q_r)$ в левой части (2) по (5) и несложных преобразований получим:

$$q_r^4 + 1,3333 q_r^3 + 2 \cdot q_r^2 + 4 \cdot q_r \cdot (1 - tg_2) + 4 \cdot \ln(tg_2) + 4 \cdot x_n \cdot \ln(n) = 0. \quad (6)$$

Целесообразность перехода от (2) к (6) определяется тем, что уравнение (6) может быть решено относительно q_r двумя методами: методом последовательных приближений и аналитическим методом (например, методом Феррари).

Рассмотрим далее последовательность формирования расчетной формулы для определения тепловых потерь с отработавшими газами в зависимости от температуры tg_2 и частоты вращения коленчатого вала двигателя n на основе уравнения регрессии. Для решения задачи используем метод, подробно изложенный в работе [5].

В последующих вычислениях будем использовать безразмерные значения параметров

$$q_{r0} = \frac{q_r}{q_{rH}}; tg_{20} = \frac{tg_2}{tg_{2H}}; n_o = \frac{n}{n_H}, \quad (7)$$

где индексом «0» обозначены безразмерные значения параметров, а индексом «H» – нормирующие значения параметров, которые в данном случае приняты следующими: $q_{rH} = 0,308$; $tg_{2H} = 385 \text{ }^\circ\text{C}$; $n_H = 1000 \text{ мин}^{-1}$.

Положим, что взаимосвязь между параметрами q_{r0} , tg_{20} , n_o по всему массиву исходных данных может быть выражена уравнением регрессии вида:

$$x_0 + x_1 \cdot n + x_2 \cdot tg_{20} + x_3 \cdot n \cdot tg_{20} + x_4 \cdot q_r = 0. \quad (8)$$

Для определения неизвестных x_i по (8) образуем систему условных однородных уравнений $A \cdot x = 0$ и методом наименьших квадратов систему нормальных уравнений $A^T A \cdot x = 0$, где A – прямоугольная матрица порядка $m \times k$ ($m = 12$ – число уравнений; $k = 5$ – число неизвестных); $A^T A$ – квадратная симметричная матрица порядка $k \times k$.

Из однородного характера системы $A^T A \cdot x = 0$ следует, что искомый вектор x_i может быть определен лишь с точностью до произвольного постоянного множителя. Это обстоятельство используем для целесообразного нормирования вектора x_i . Например, полагая $x_4 = -1,0$, запишем однородную систему в виде $\bar{A} \cdot x = f$, где \bar{A} – симметричная матрица порядка $(k-1) \times (k-1)$; f – вектор-столбец свободных членов.

Если элементы матрицы A заданы точно и определитель матрицы $A^T A$ равен нулю, то в результате решения системы $\bar{A} \cdot x = f$ можно определить с любой наперед заданной точностью компоненты вектора x_i . В нашем случае найти

точное решение уравнения $\bar{A} \cdot x = f$ невозможно по следующим причинам:

- факторы, на основе которых составлено уравнение (8), отобраны приближенно;
- численные значения определяющих параметров tg_{20} и n_o заданы с погрешностями.

В условиях приближенного задания исходных данных и приближенных вычислений над ними, возможность перенести в решение задачи информацию, содержащуюся в исходных данных, появляется только в том случае, если располагать количественными признаками, позволяющими контролировать ход вычислительного процесса от постановки задачи до конечных результатов.

Используем для этой цели аналитическое тождество:

$$\det(A^T A) = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdots \lambda_k. \quad (9)$$

Из (9) следует, что матрица $A^T A$ по своим свойствам будет близка к просто вырожденной в том случае, если только собственное число λ_k существенно меньше предполагаемого уровня погрешности задания ее элементов, а собственные числа $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdots \lambda_{k-1}$ – больше этого уровня. Только при такой структуре собственных чисел может быть определено решение, соответствующее физическому смыслу задачи [5,6,7].

Здесь уместно отметить, что в силу построения матриц $A^T A$ и \bar{A} их собственные числа всегда вещественные и положительные или равны нулю, а их значения определяются в результате решения уравнений:

$$\det(A^T A - E \cdot \lambda) = 0; \quad \det(\bar{A} - E \cdot \lambda) = 0. \quad (10)$$

С учетом изложенных теоретических предпосылок, для количественной оценки свойств матрицы $A^T A$, сформированной на основе уравнения (8), используем спектр ее собственных чисел:

$$\lambda_1 = 53,299; \lambda_2 = 2,684; \lambda_3 = 0,029; \lambda_4 = 0,013; \lambda_5 = 1,175 \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

В данном случае структура собственных чисел матрицы $A^T A$ такова, что только число λ_5 заведомо меньше предполагаемого уровня погрешности задания ее элементов, т.е. по своим свойствам матрица $A^T A$ близка к просто вырожденной. Поэтому, положив $x_4 = -1,0$, в результате решения системы $\bar{A} \cdot x = f$, получены следующие численные значения неизвестных:

$$x_0 = -0,059; x_1 = 0,702; x_2 = 0,972; x_3 = -0,589. \quad (12)$$

С учетом решения (12) уравнение (8) для определения тепловых потерь с отработавшими газами четырехтактных судовых дизелей принимает вид:

$$q_{r0} = -0,059 + 0,702 \cdot n_o + 0,972 \cdot tg_{20} - 0,589 \cdot n_o \cdot tg_{20}. \quad (13)$$

Полученные решения одной и той же задачи тремя различными численными методами, используем для оценки качества этих методов.

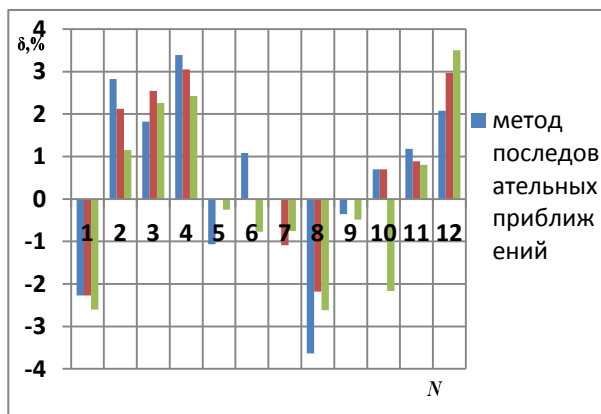


Рис. 2. Гистограммы распределения погрешностей расчета тепловых потерь с отработавшими газами четырехтактных двигателей

Важнейшими из критериев оценки качества численного метода является его надежность, т.е. способность перенести в решение задачи почти всю информацию, содержащуюся в ее условии. Численный метод принято считать надежным, если при его применении решение воспроизводит

исходные данные с погрешностью, не превышающей существенно неустранимую погрешность, обусловленную неопределенностью исходных данных [7].

На рис. 2 приведены совмещенные гистограммы распределения погрешностей расчета тепловых потерь с отработавшими газами четырехтактных двигателей по уравнениям (2),(6) и (13). Видно, что уравнения (2),(6) и (13) воспроизводят исходные данные примерно с одинаковой погрешностью. Только в трех случаях суммарная погрешность расчета больше $\pm 3\%$.

Заключение

1. Показана возможность формирования расчетных зависимостей для определения тепловых потерь с отработавшими газами двухтактных судовых дизелей на основе параметров доступных для оперативного контроля в судовых условиях тремя численными методами.

2. Трансцендентная зависимость и уравнение регрессии воспроизводят опытные данные примерно с одинаковой погрешностью, однако процесс определения $q_{го}$ по уравнению регрессии существенно проще.

Литература

1. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
2. Костин, А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справ. пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. Л.: Машиностроение, 1979. 222с.
3. Ковальчук, Л. И. Трансцендентные зависимости для оценки тепловых потерь в охлаждающую воду / Л. И. Ковальчук, И. Л. Алексеев // Двигателестроение. 2009. № 1. С. 18–20.
4. Бехрендт, Ц. Математические модели функционирования судового энергетического комплекса с глубокой утилизацией теплоты : дис. ... доктора техн. наук: 05.08.05 / Ц. Бехрендт. Калининград, 2004. 374 с.
5. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа: справ. руководство / К. Ланцош; пер. с англ. М. 3. Кайнера; под ред. А. М. Лопшица. М.: ГИФМЛ, 1961. 524 с.
6. Кублановская, В. Н. Численные методы алгебры / В. Н. Кублановская. Л.: ЛКИ, 1978. 112 с.
7. Фадеев, Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фадеев, В. Н. Фадеева. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2009. 736 с.

References

1. Gukhman A. A. Vvedeniye v teoriyu podobiya (Introduction to the theory of similarity). Moscow, Vysshaya shkola, 1973. 296 p.
2. Kostin A.K., Larionov V.V., Mikhaylov L.I. Teplonapryazhennost' dvigateley vnutrennego sgoraniya: sprav. posobiye (The heat release rate internal combustion engines: a reference guide). Leningrad, Mashinostroyeniye, 1979. 222 p.
3. Koval'chuk L. I., Alekseyev I. L. (2009) Transsendentnyye zavisimosti dlya otsenki teplovykh poter' v okhlazhdayushchuyu vodu (Transcendental relations for estimation of heat losses in cooling water). Dvigatelistroyeniye, № 1, pp. 18-20.
4. Bekhrendt Ts. Matematicheskiye modeli funktsional'nirovaniya sudovogo energeticheskogo kompleksa s glubokoy utilizatsiyey teploty : dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk (The mathematical model of functioning of marine energy complex with deep heat: dissertation ... dr. techn. sciences). Kaliningrad, 2004. 374 p.
5. Lantsosh K. Prakticheskiye metody prikladnogo analiza: sprav. rukovodstvo (Practical methods of applied analysis: reference guide). Moscow, GIFML, 1961. 524 p.
6. Kublanovskaya V. N. Chislennyye metody algebrы (Numerical methods of algebra). Leningrad, LKI, 1978. 112 p.
7. Fadeyev D. K., Fadeyeva V. N. Vychislitel'nyye metody lineynoy algebrы (Computational methods of linear algebra). Saint Petersburg, Lan', 2009. 736 p.

УДК 621.565

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕДОСТАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕГО МИКРО-ОРЕБРЕНИЯ ТРУБ ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТОВ В СУДОВЫХ ИСПАРИТЕЛЯХ

Сергей Валерьевич Кошелев

заведующий лабораторно-исследовательским центром холодильных систем
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: entermoria@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности и разновидности труб, имеющих внутреннее микро-оребрение. Такие трубы применяются в современных теплообменных аппаратах и направлены на повышение интенсивности теплоотдачи при умеренном повышении гидравлического сопротивления. Показана сложность и необходимость определения конструктивных параметров при расчете коэффициента теплоотдачи и падения давления хладагента в таких трубах по обобщенным методикам разных авторов. На основании собранных из доступных источников данных рассчитаны конструктивные параметры ряда труб со спиральным микро-оребрением. Предложено четыре варианта расчета, которые позволяют определить недостающие параметры микро-оребренных труб с в зависимости от известных исходных данных. Данная работа будет полезна в инженерной практике, в связи с тем, что большинство, как производителей оборудования, так и исследователей не приводят достаточное количество конструктивных данных, необходимых для тепло-гидравлического расчета теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: кипение хладагента, микро-оребренные трубы, судовые испарители, конструктивные параметры.

DETERMINATION OF THE FAILED PARAMETERS OF THE INTERNAL MICRO-FINNING OF PIPES UNDER BOILING OF COOLING AGENTS IN MARINE DISTILLERS

Sergey V. Koshelev

Head of the Laboratory-Research Center for Refrigeration Systems
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: entermoria@mail.ru

Abstract

The paper considers features and varieties of pipes with internal micro-finishing. Such pipes are used in modern heat exchangers and are aimed at increasing the intensity of heat transfer with a moderate increase in hydraulic resistance. The paper shows complexity and necessity of determining the design parameters when calculating the heat transfer coefficient and the pressure drop of a cooling agent in such pipes using the generalized methods of different authors. Based on the data collected from available sources, the design parameters of some pipes with spiral micro-finishing have been calculated. Four calculation options have been proposed that allow determination of the missing parameters of micro-finned pipes, depending on the known input data. This work will be useful in engineering practice, due to the fact that most equipment manufacturers and researchers do not provide a sufficient amount of structural data necessary for thermal-hydraulic calculation of heat exchangers.

Key words: boiling of a cooling agent, micro-finned pipes, marine distillers, design parameters.

Введение

В целях улучшения технических характеристик теплообменных аппаратов (ТОА) уже давно применяются различные устройства. Для турбулизации потока в трубах широкое распространение получили различного рода вставки. [1,2]. С 1977 года началось применение труб с внутренним микро-оребрением [3]. Оно выполняется в виде винтовых (спиральных) канавок глубиной до 0,4мм. Число канавок, угол закручивания спирали и форма образующихся в стенке трубы выступов многообразны. Для уточнения в зарубежных источниках такие трубы

называют spirally grooved fin-tubes. Существует микро-оребрение елочкой (herringbonemicrofin), когда канавки под симметричными углами идут как бы навстречу друг другу и занимают определенные части окружности трубы. В ряде случаев канавки разной глубины, но с противоположным углом закручивания пересекаются.

Наиболее популярными стали трубы со спиральными канавками, которые в дальнейшем будем называть МОТ. Результаты испытаний ТОА с внутренним микро-оребрением труб показывает увеличение коэффициента теплоотдачи (КТО) как однофазной среды, так и двухфазного потока,

возникающего при кипении или конденсации хладагента. Интенсификации теплоотдачи способствуют: а) увеличение конвективной составляющей однофазного потока; б) рост составляющей пузырькового кипения за счет дополнительной площади внутренней поверхности; в) увеличение площади кольцевой пленки за счет эффекта смачивания; г) превращение расслоенно-волнового течения с частично смоченным параметром трубы в кольцевой поток при пониженных значениях массовой скорости w_p и паросодержания x [4]. По сравнению с гладкими трубами микро-оребрение создает дополнительное гидравлическое сопротивление, но оно обычно оказывается меньше, чем при наличии вставок в гладких трубах. Из-за отмеченных достоинств ТОА с внутренним микро-оребрением стали перспективными. В нашу страну они поставляются преимущественно в качестве испарителей и конденсаторов малых и средних холодильных машин, включая бытовые и полупромышленные кондиционеры.

Несмотря на широкое распространение ТОА с микро-оребрением, тепловые и гидравлические их характеристики остаются неизвестными для потребителей. Поставщики обычно приводят основные показатели при проектном (номинальном) режиме работы оборудования. Нередко указывается допустимый диапазон режимов работы. Параметры внутреннего оребрения указываются далеко не всегда. Удельные показатели ТОА и всей ХМ при других условиях, характерных для судовой техники, потребители предсказать не могут из-за отсутствия методик расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении и конденсации хладагентов в трубах с микро-оребрением. Обзор литературы показывает, что подготовка таких методик за рубежом проводится, но далека от завершения. Ввиду сложности процессов кипения и конденсации рабочих веществ, а также многообразия форм оребрения и диаметров труб, разработка подобных методик оказывается затруднительной [5].

В связи с этим существует необходимость систематизации и последующей обработки экспериментальных данных разных исследователей о КТО и падении давления в МОТ. Сопоставление их с данными, полученными расчетным путем, затруднительно, так как в разных методиках задействованы разные сочетания конструктивные параметров МОТ. В публикациях с экспериментальными данными о КТО и градиентах давления хладагентов в МОТ приводится лишь

несколько показателей микро-оребрения. Чтобы воспользоваться той или иной методикой, приходится определять недостающие показатели. Методика такого определения в настоящее время отсутствует.

1. Особенности микро-оребрения

К спиральным микро-оребрением относятся трубы с числом ребер 40-80, углом вершины ребра 30-70 градусов и углом закручивания спирали 15-30 градусов. Высота таких труб не превышает 0,4 мм. Когда в трубах имеется менее 30 ребер высотой более 0,4 мм, их считают низко-оребрёнными (lowfinned) или просто внутренне оребренными (internallyfinned) [6]. Наиболее популярными стали микро-оребрённые трубы, их выпускают многие компании. Форма, число и размеры спиральных ребер весьма разнообразны. Чаще всего поперечное сечение ребер имеет вид трапеции или треугольника с закругленными краями, рис. 1. Иногда в сечении вершина ребра имеет форму полукруглости.

Общепринятого перечня и обозначения параметров микро-оребрения труб не существует. Чаще всего указывают наружный диаметр трубы d_0 , толщину дна канавки t_w , высоту ребра h , угол вершины ребра α , угол закручивания спирали β , число канавок n . Нередко используется диаметр у основания ребра $d_r = d_0 - 2 \cdot t_w$, именуемый часто наибольшим внутренним диаметром. При обработке опытных данных его чаще всего принимают в качестве номинального диаметра [7]. Иногда в качестве номинального используется диаметр у вершины ребер $d_i = d_r - 2h$ или диаметр при средней высоте внутренних ребер d_m . Дополнительно на рис.1 обозначено: длина периметра внутренней части трубы, приходящаяся на 1 ребро $Pr1 = \pi \cdot d_r / n$; длина одной грани ребра $l_1 = h \cdot \cos(\alpha/2)$; длина основания грани ребра $b = l_1 \cdot \sin(\alpha/2)$. Заметим, что при трапециевидной форме ребер перечисленных данных недостаточно для определения периметра ребристой поверхности и площади живого сечения микро-оребрённой трубы. Дополнительно требуется знать ширину вершины и основания ребра или хотя бы ширину основания канавки, что указывается не часто. Иногда приводится площадь теплопередающей поверхности F_1 в $\text{мм}^2/\text{м}$. В книге [7] для ряда типов оребрения указано отношение площади ребристой поверхности к площади гладкой трубы с номинальным диаметром d_r .

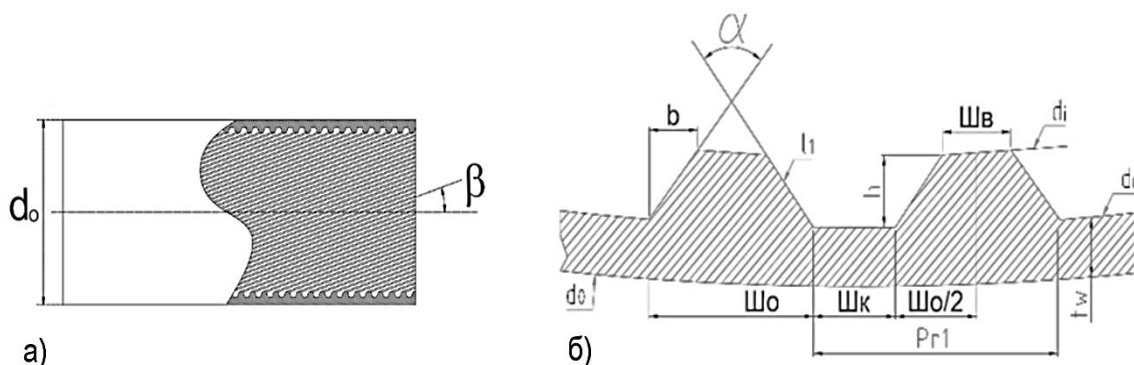


Рис. 1. Схема микро-орбренных труб (МОТ): а) продольное сечение; б) поперечный разрез

2. Конструктивные параметры МОТ

Первоначально с микро-орбрением стали изготавливать трубы диаметром $d_0 = 9,52$ мм. Они получили наибольшее распространение. Впоследствии был освоен выпуск микро-орбренных труб как большего, так и меньшего диаметра. Расширяется выпуск микро-орбренных труб диаметром менее 4 мм, которые считаются мини-трубами. В первую очередь, поиск экспериментальных данных и расчетных зависимостей проводился с ориентацией на трубы с наружным диаметром 7,45 мм. Предпочтение отдавалось данным по кипению R410A. Ввиду

ограниченного количества публикаций собиралась информация по кипению разных хладагентов в микро-орбренных трубах разных диаметров, за исключением мини- и микро-труб, на которые распространяются другие зависимости даже при отсутствии внутреннего орбрения. Численные значения параметров внутреннего микро-орбрения труб, по которым удалось найти полезную информацию приводятся в табл.1. В нее входят, как конструктивные данные, приводимые в источниках, так и параметры, полученные на их основании с применением расчета. В первом ее столбце указан номер источника с информацией о параметрах орбрения.

Таблица 1

Параметры внутреннего микро-орбрения труб

Номер источника	d_0 мм	d_r мм	h мм	α град	β град	n	S_r мм	$F_{ж}$ мм ²	d_h мм
[8]	9,52	8,92	0,2	50	18	60	45,528	61,341	5,479
[9]	9,52	8,92	0,2	33	18	82	48,180	60,331	4,963
[9]	7	6,4	0,2	33	18	60	38,02	30,257	3,028
[10]	7	6,56	0,1	40	15	65	30,750	32,783	4,264
[11]	5	4,6	0,14	40	18	40	23,434	16,325	2,673
[3]	9,52	8,96	0,14	66	18	60	39,175	62,258	6,426
[12]	7	6,46	0,15	50	18	60	33,057	31,124	3,834
[13]	7	6,48	0,15	50	18	50	31,443	32,438	4,008
[13]	12,7	11,98	0,25	65	30	60	62,438	110,28	6,929
[14]	7	6,5	0,18	40	18	50	33,016	31,329	3,61
[15]	9,52	8,92	0,12	25	25	60	39,567	60,779	5,569
[15]	7	6,46	0,15	55	18	60	31,21	31,238	3,808
[16]	9,52	8,92	0,12	68	25	60	35,668	61,677	6,269
[17]	9,52	8,62	0,2	40	18	41	38,552	57,349	5,659
[18]	12,7	11,3	0,3	57	18	60	56,906	94,914	6,345
[19]	11,6	8,15	0,23	43	13	60	44,387	49,199	4,321
[20]	9,5	8,91	0,2	50	18	60	42,318	60,8	5,466
[21]	9,52	8,92	0,2	45	18	60	44,048	61,137	5,28
[22]	8,01	7,47	0,17	55	18	55	34,806	42,765	4,674
[23]	9,52	8,95	0,24	20	15	55	50,257	61,81	4,752

Наряду с упомянутыми обозначениями приводятся: S_p - периметр поверхности орбрения, перпендикулярной оси трубы; $F_{ж}$ - площадь живого (проходного) сечения трубы; d_h - гидравлический радиус трубы. Падение давления потока любой среды в каналах разной формы обычно

рассчитывается с использованием гидравлического диаметра d_h , который определяется по известной формуле:

$$d_h = 4F_{ж}/S_p,$$

где $F_{ж}$ – площадь живого сечения канала; S_p – периметр сечения канала.

С учетом угла закручивания спирали β величина S_p находится путем деления периметра, перпендикулярного оси канала S_p , на $\cos\beta$ [24]. Лишь в указанной здесь работе для трубы диаметром 9,52 мм с треугольной формой сечения ребер приводятся значения всех величин, входящих в вышеупомянутую формулу определения d_h .

Многие авторы статей с полезной информацией приводят лишь часть данных, необходимых для определения всех параметров микро-оробрения труб. Даже форма ребер указывается не всегда. В случае неполной информации предлагается считать форму ребер трапециевидной, которая в частном случае при ширине вершины $ш_в = 0$ становится треугольной. При известных значениях d_0, t_w, h, n, α и β искомыми величинами становятся $F_{ж}$, S , d_h и площадь теплопередающей поверхности F_1 , приходящаяся на 1м длины трубы. С позиций сопоставления микро-оробренных труб с гладкими необходимо знать эквивалентный диаметр d_e .

3. Расчет недостающих параметров МОТ

В зависимости от перечня исходных данных могут быть разные варианты расчета.

А. Известна ширина канавки $ш_к$:

$$ш_о = \pi d_r / n - ш_к;$$

$$ш_в = ш_о - 2 \cdot b;$$

$$\text{периметр } S_p = (2l_1 + ш_в + ш_к) \cdot n;$$

$$\text{площадь внутренней поверхности } F_{вн} = S_p \cdot l_T;$$

$$\text{площадь сечения ребра } F_p = ш_в \cdot h + b \cdot h;$$

$$\text{площадь живого сечения } F_{ж} = 0,785 d_r^2 - F_p \cdot n;$$

$$\text{диаметры: } d_h = 4 F_{ж} \cdot \cos\beta / S_p; d_e = (F_{ж} / 0,785)^{0,5};$$

$$\text{шаг спиралевидной канавки (ребра) } P_1 = \pi \cdot d_r \cdot \text{tg}(90 - \beta);$$

шаг между смежными спиралями $P = P_1 / n$.

Б. Неизвестны $ш_к$ и $ш_в$.

Принимаем $ш_в / ш_к = m$; ($m = 0,1 - 1,5$). С учетом выражений для определения l_1 , b и $Pr1$ записываем систему трех уравнений:

$$\begin{cases} ш_о = ш_в + 2b \\ ш_к = Pr1 - ш_о \\ ш_в = ш_к \cdot m \end{cases}$$

Из нее получаем $ш_к = (Pr1 - 2b) / (1 + m)$.

Остальные параметры находятся, как в варианте А. Подбирать значение m приходится по дополнительной информации.

В. Известна ширина основания ребра $ш_о$.

Отличается от варианта А тем, что $ш_к = Pr1 - ш_о$.

Г. Форма ребер треугольная.

Отличается от варианта Б значением $m = 0$, откуда $ш_в = 0$.

Закругление вершины трапеции или треугольника иногда показывают на рисунках (фотографиях) микро-оробрения, но без указания размеров закругления. Очевидно, что закругления несколько уменьшают периметр S_p , а следовательно, и внутреннюю поверхность $F_{вн}$. Площадь $F_{ж}$ немного возрастает. В случае наличия измеренных значений $F_{вн}^и$ и $F_{ж}^и$ целесообразно ввести коэффициенты для корректировки расчетных значений: $K_1 = F_{вн} / F_{вн}^и$; $K_2 = F_{ж} / F_{ж}^и$. Отметим, что инструментальные измерения параметров внутреннего микро-оробрения требуют применения специального оборудования. В некоторых источниках приводятся параметры микро-оробрения, полученные с использованием электронного микроскопа.

Заключение

На основании проведенного анализа предложены четыре варианта расчета, позволяющие находить недостающие параметры труб с внутренним микрооробрением. Они помогут специалистам проводить расчеты тепло-гидравлических характеристик теплообменных аппаратов по неполной информации о параметрах внутреннего оробрения.

Литература

1. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин/ А. А. Гоголин и др. –М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 224 с.
2. Теплообменные аппараты холодильных установок/ Г.Н. Данилова и др. - Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
3. Jiang G.B., Tan J.T., NianQ.X.,Tang S.C., Tao W.Q. Experimental study of boiling heat transfer in smooth/micro-fin tubes of four refrigerants. Int. J. HeatMassTransfer. 98 (2016). Pp. 631-642.
4. Thome J.R., 2004. Engineering Data book III, Wolverine Tube Inc., Huntsville, AL.
5. Кошелев С.В. Падение давления хладагента R410a в змеевиках воздухоохладителя с внутренним микрооробрением/ С.В. Кошелев, А.И. Ейдеюс, Ю.Н. Сластихин // Вестник Международной академии холода. 2018. №3. С. 4-13.
6. Klaus Spindler, Hans Müller-Steinhagen. Flow boiling heat transfer of R134a and R404A in a micro-fin tube at low mass fluxes and low heat fluxes. Heat and Mass Transfer (2009) 45. Pp. 967-977.
7. Thome J.R., 2004. Engineering Data book III, Wolverine Tube Inc., Huntsville, AL.
8. Choi J. Y., Kedzierski M. A., Domanski P. A. 2001. Generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth and micro-fin tubes. In.: Proceedings of IIF - IIR Commission B1, Paderborn, Germany, B4. Pp. 9-16.
9. Bandarra Filho E.P., Sáiz-Jabardo J.M. Convective boiling performance of refrigerant R-134a in herringbone and micro-fin copper tubes. (2005). Elsevier Ltd and IIR. Pp. 81-91.
10. Kim N. H. Evaporation heat transfer and pressure drop of R410A in a 7,0 mm O.D. micro-fin tubes at low flow rates. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 39, № 9. Pp. 761-722. 2015.
11. Ding G., Hu H., Huang X., Deng B., Gao Y. Experimental investigation and correlation of two-phase frictional pressure drop of R410A–oil mixture flow boiling in a 5 mm micro-fin tube. Int. J. Refrigeration, 32. (2009). Pp. 150-161.

12. Seo K., Kim Y., Lee K. J., Park Y. C. An Experimental study on convective boiling of R-22 and R-410A in horizontal smooth and micro-fin tubes, *KSME International Journal*, 15 (8). Pp. 1156-1164. 2001.
13. Passos, J. C., Kuser, V. F., Haberschill, P., Lallemand, M. Convective boiling of R-407C inside horizontal micro-fin and plain tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27(2003). Pp. 705–713.
14. Ding G., Hu H., Huang X., Deng B., Gao Y. Experimental investigation and correlation of two-phase frictional pressure drop of R410A–oil mixture flow boiling in a 5 mm micro-fin tube. *Int. J. Refrigeration*, 32. (2009). Pp. 150-161.
15. Yongchan Kim, Kookjeong Seo, Jin Taek Chung. Evaporation heat transfer characteristics of R-410A in 7 and 9.52 mm smooth/micro-fin tubes. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002). Pp. 716–730.
16. Kim M.H., Shin J.S., Lim B.H. Evaporating heat transfer of R22 and R404A in 9,52 mm smooth and microfin tubes. (2002). *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 565.
17. L.P.M. Colombo, A. Lucchini, A. Muzzio. Flow patterns, heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation of R134A in microfin tubes. *International journal of refrigeration* 35 (2012). Pp. 2150-2165.
18. Ming-huei Yu, Tsun-kuo Lin, Chyuan-chyi Tseng. Heat transfer and flow pattern during two-phase flow boiling of R-134a in horizontal smooth and microfin tubes. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002). Pp. 789–798.
19. Padovan A. Experimental study on flow boiling of refrigerants inside horizontal tubes. Sede Amministrativa: Università degli studi di Padova. Dipartimento di Fisica Tecnica. 2008. Pp. 184.
20. L.J. Hamilton, M.A. Kedzierski, M.P. Kaul. Horizontal convective boiling of refrigerants and refrigerant mixtures within a micro-fin tube. 2005. Pp. 80.
21. Cheng-Shu Kuo, Chi-chuan Wang. Horizontal flow boiling of r22 and R407C in a 9.52 mm micro-fin tube. *Applied Thermal Engineering* Vol. 16, Nos 819. Pp. 719-73 1, 1996.
22. Goto N., Inoue N., Ishiwatari, N. 2001. Condensation and evaporation heat transfer of R-410A inside internally grooved horizontal tubes, *Int. J. Refrig.*, 24(7). Pp. 628–638.
23. Klaus Spindler, Hans Müller-Steinhagen. Flow boiling heat transfer of R134a and R404A in a micro-fin tube at low mass fluxes and low heat fluxes. *Heat and Mass Transfer* (2009) 45. Pp. 967-977.
24. ASHRAE Fundamentals Handbook. Chapter 4. Two-phase flow. 1997.

References

1. Intensification of heat transfer in evaporators of refrigerating machines. A.A. Gogolin et al. –M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost'. 1982. 224 p.
2. Теплообменные аппараты холодильных установок. Г.Н. Данилова и др. - Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
3. Jiang G.B., Tan J.T., Nian Q.X., Tang S.C., Tao W.Q. Experimental study of boiling heat transfer in smooth/micro-fin tubes of four refrigerants. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 98 (2016). Pp. 631-642.
4. Thome J.R., 2004. *Engineering Data Book III*, Wolverine Tube Inc., Huntsville, AL.
5. Koshelev S.V. Padeniye davleniya khladagenta R410a v zmeyevikakh vozdukhokhladitelya s vnutrennim mikroorebreniyem. S.V. Koshelev, A.I. Yeydeyus, YU.N. Slastikhin. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*. 2018. №3. Pp. 4-13.
6. Klaus Spindler, Hans Müller-Steinhagen. Flow boiling heat transfer of R134a and R404A in a micro-fin tube at low mass fluxes and low heat fluxes. *Heat and Mass Transfer* (2009) 45. Pp. 967-977.
7. Thome J.R., 2004. *Engineering Data book III*, Wolverine Tube Inc., Huntsville, AL.
8. Choi J. Y., Kedzierski M. A., Domanski P. A. 2001. Generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth and micro-fin tubes. In.: *Proceedings of IIF - IIR Commission B1*, Paderborn, Germany, B4. Pp. 9-16.
9. Bandarra Filho E.P., Sáiz-Jabardo J.M. Convective boiling performance of refrigerant R-134a in herringbone and micro-fin copper tubes. (2005). Elsevier Ltd and IIR. Pp. 81-91.
10. Kim N. H. Evaporation heat transfer and pressure drop of R410A in a 7,0 mm O.D. micro-fin tubes at low flow rates. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, № 9. Pp. 761-722. 2015.
11. Ding G., Hu H., Huang X., Deng B., Gao Y. Experimental investigation and correlation of two-phase frictional pressure drop of R410A–oil mixture flow boiling in a 5 mm micro-fin tube. *Int. J. Refrigeration*, 32. (2009). Pp. 150-161.
12. Seo K., Kim Y., Lee K. J., Park Y. C. An Experimental study on convective boiling of R-22 and R-410A in horizontal smooth and micro-fin tubes, *KSME International Journal*, 15 (8). Pp. 1156-1164. 2001.
13. Passos, J. C., Kuser, V. F., Haberschill, P., Lallemand, M. Convective boiling of R-407C inside horizontal micro-fin and plain tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27(2003). Pp. 705–713.
14. Ding G., Hu H., Huang X., Deng B., Gao Y. Experimental investigation and correlation of two-phase frictional pressure drop of R410A–oil mixture flow boiling in a 5 mm micro-fin tube. *Int. J. Refrigeration*, 32. (2009). Pp. 150-161.
15. Yongchan Kim, Kookjeong Seo, Jin Taek Chung. Evaporation heat transfer characteristics of R-410A in 7 and 9.52 mm smooth/micro-fin tubes. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002). Pp. 716–730.
16. Kim M.H., Shin J.S., Lim B.H. Evaporating heat transfer of R22 and R404A in 9,52 mm smooth and microfin tubes. (2002). *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 565.
17. L.P.M. Colombo, A. Lucchini, A. Muzzio. Flow patterns, heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation of R134A in microfin tubes. *International journal of refrigeration* 35 (2012). Pp. 2150-2165.
18. Ming-huei Yu, Tsun-kuo Lin, Chyuan-chyi Tseng. Heat transfer and flow pattern during two-phase flow boiling of R-134a in horizontal smooth and microfin tubes. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002). Pp. 789–798.

-
19. Padovan A. Experimental study on flow boiling of refrigerants inside horizontal tubes. Sede Amministrativa: Università degli studi di Padova. Dipartimento di Fisica Tecnica. 2008. Pp. 184.
 20. L.J. Hamilton, M.A. Kedzierski, M.P. Kaul. Horizontal convective boiling of refrigerants and refrigerant mixtures within a micro-fin tube. 2005. Pp. 80.
 21. Cheng-Shu Kuo, Chi-chuan Wang. Horizontal flow boiling of r22 and R407C in a 9.52 mm micro-fin tube. Applied Thermal Engineering Vol. 16, Nos 819. Pp. 719-73 1, 1996.
 22. Goto N., Inoue N., Ishiwatari, N. 2001. Condensation and evaporation heat transfer of R-410A inside internally grooved horizontal tubes, Int. J. Refrig., 24(7). Pp. 628–638.
 23. Klaus Spindler, Hans Müller-Steinhagen. Flow boiling heat transfer of R134a and R404A in a micro-fin tube at low mass fluxes and low heat fluxes. Heat and Mass Transfer (2009) 45. Pp. 967-977.
 24. ASHRAE Fundamentals Handbook. Chapter 4. Two-phase flow. 1997.

УДК 539.1.08; 621.892.84

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СУДОВЫХ ТОПЛИВ И МАСЕЛ

Николай Яковлевич Синявский

доктор физико-математических наук, профессор
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Иван Георгиевич Мершиев

инженер института физико-математических наук и информационных технологий
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта
236016, Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: IMershiev@kantiana.ru

Галина Сергеевна Куприянова

доктор физико-математических наук, профессор
Институт физико-математических наук и информационных технологий
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта
236016, Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: galkupr@yandex.ru

Аннотация

Цель данной работы - исследование возможностей методов ЯМР – спектроскопии и релаксометрии для идентификации и контроля качества судовых топлив и смазочных материалов с применением современных подходов и технических возможностей. Новизной исследования явилось использование релаксометрии ЯМР протонов в слабом магнитном поле с инверсией интегрального преобразования. Показана специфичность распределений времен релаксации исследованных продуктов, сформулированы рекомендации для создания перспективного контрольно-измерительного оборудования.

При исследовании применялись методы ЯМР в высоком поле и ЯМР релаксометрия водорода в слабом магнитном поле с инверсией преобразования Лапласа для получения распределений времен продольной (T_1) и поперечной (T_2) релаксации.

Показано, что функции распределения $f(T_1)$ и $f(T_2)$ могут служить своего рода паспортом топлива и моторного масла. Создание баз данных таких распределений для всех топлив и масел и разработка специализированных ЯМР релаксометров низкого поля позволит производить экспресс-анализ и контролировать качество.

Надежность и достоверность полученных результатов подтверждается устойчивостью экспериментов при их многократном повторении, корректностью математической обработки и широкой апробацией используемых методов в мировой практике.

Ключевые слова: судовые топлива и масла, мониторинг качества, релаксометрия ЯМР

NEW APPROACHES TO IDENTIFICATION AND EVALUATION OF THE QUALITY OF MARINE FUELS AND OILS

Nikolay Y. Sinyavskiy

DSc in Physics and Mathematics, Professor
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Ivan G. Mershiev

Engineer at the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies
I.Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: IMershiev@kantiana.ru

Galina S. Kupriyanova

DSc in Physics and Mathematics, Professor
the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies
I.Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: galkupr@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work is to study capabilities of NMR methods - spectroscopy and relaxometry for identification and quality control of marine fuels and lubricants using modern approaches and technical capabilities. The novelty of the study was the use of NMR relaxometry of protons in a weak magnetic field with inversion of the integral transform. The specificity of the relaxation time distributions of the studied products has been shown, and recommendations have been made for the creation of promising test equipment.

The study involved NMR methods of high field and NMR relaxometry of hydrogen in a weak magnetic field with inversion of the Laplace transform, to obtain distributions of longitudinal (T_1) and transverse (T_2) relaxation times.

It has been shown that distribution functions $f(T_1)$ and $f(T_2)$ can serve as a kind of passport for fuel and engine oil. Creation of databases of such distributions for all fuels and oils and development of specialized low-field NMR relaxometers will allow for rapid analysis and quality control.

Reliability and authenticity of the obtained results have been confirmed by the stability of experiments with their recurrent repetition, correctness of mathematical processing and the extensive testing of the methods used in world practice.

Key words: marine fuels and oils, quality, NMR relaxometry

Введение

Повышение надежности, долговечности и экономичности машин и агрегатов - одна из главных задач рыбопромыслового комплекса. Мировая практика эксплуатации судовых дизельных установок свидетельствует, что наряду с совершенствованием конструкции и технологии изготовления двигателей, важнейшим фактором, определяющим их технический ресурс, является качество используемых топлив и масел. В условиях эксплуатации качество используемого для смазки масла является одним из немногих средств, позволяющих без ощутимых затрат достигнуть заметное повышения долговечности и экономичности двигателя.

Информацию о старении масел судовых двигателей обычно получают посредством комплексного лабораторного анализа, в результате которого определяется изменение основных показателей, принятых для оценки качества масла. Основные физико-химические характеристики, определяемые в лабораторных условиях: температура вспышки в открытом тигле, плотность, водорастворимые кислоты и щелочи, кислотность, кислотное и щелочное число, содержание воды, кинематическая вязкость, вязкость условная, коксуемость, содержание механических примесей и их содержание, зольность.

Изучение процессов старения масел, дисперсности механических примесей имеет первостепенное значение для продления эксплуатационного моторесурса двигателя. Моторные масла обеспечивают смазывающее, терморегулирующее, моющее, уплотняющее и антикоррозионное действия. При работе двигателя на масло смазки действуют много факторов: большая температура, горячее, попадающее в систему смазки, кислород, содержащийся в воздухе, посторонние примеси. Свойства масла из-за множества физических и химических процессов, которым оно подвергается, меняются: масло «старееет» [1]. В процессе работы оно темнеет, изменяется его вязкость, температура вспышки, кислотность, увеличивается молекулярный вес, в масле появляются механические примеси

органического и неорганического происхождения. Продукты окисления масла снижают надежность работы и увеличивают износ двигателя. В двигателе масло стареет значительно интенсивнее, чем в условиях искусственного окисления в лаборатории. Исследования группового химического состава масла в зависимости от продолжительности работы двигателя показало, что вклад ароматических углеводородов практически не меняется, но растет вклад смолистых веществ, вызванный окислением нафтеновых и алкановых соединений.

Определению зависимости между изменением ряда важнейших физико-химических показателей масла и износов двигателя посвящено довольно значительное число исследований. Однако противоречивость полученных результатов заставляет подходить к ним с известной осторожностью.

Применение современных масел, содержащих диспергирующие присадки, позволяет в настоящее время значительно продлить их сроки службы в дизелях. Надежная работа двигателей с минимальными износами деталей трения и наименьшим расходом смазочных масел может быть обеспечена только при своевременной смене масла. Преждевременная смена масла также приводит к повышению интенсивности изнашивания двигателей.

Для анализа состава и свойств топлив и смазочных материалов используется множество физических и химических методов, в том числе и метод ЯМР – спектроскопии. Сложность в том, что эти методы требуют значительных затрат времени, могут применяться только в условиях специализированных лабораторий, оснащенных сложным и дорогостоящим оборудованием. Развитие новых подходов для экспресс-тестирования качества судовых нефтепродуктов с использованием малогабаритных приборов является актуальным.

В работе [2] нами были исследованы судовое маловязкое топливо, дизельное топливо, смесь этих топлив, масла SN-150 и SN-500, мазут М-100. Показано, что распределения времен релаксации T_1 и T_2 различны для разных нефтепродуктов.

Анализируя эти распределения было высказано предположение, что модальность распределений, интенсивности и положения пиков определяются соотношением парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов.

Спектры ЯМР высокого разрешения протонов для судового маловязкого топлива (СМТ) приведены в нашей публикации [3]. В этой работе для решения проблемы многокомпонентности на основе метода минимизации среднеквадратичного отклонения и регуляризации [4] предложен алгоритм обобщенной

инверсии для разделения гауссовских и экспоненциальных спадов сигналов ЯМР.

В работе [5] предлагается метод измерения времени спин-спиновой релаксации протонов для оценки ресурса моторных масел и для контроля степени износа двигателя.

Цель данной работы - исследование возможностей методов ЯМР – спектроскопии и релаксометрии с инверсией интегрального преобразования для идентификации и контроля качества судовых топлив и смазочных материалов.



а)



б)

Рис. 1. Спектрометры ЯМР Varian 400 (а) и ЯМР/ЯКР Testag-Apollo (б).

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Для получения спектров ЯМР высокого разрешения протонов использованы спектрометр Varian 400 (рис. 1а) и программа SpinWorks. Релаксационные измерения ЯМР протонов выполнены на частоте 13.65 МГц на спектрометре Testag Apollo (рис. 1б) с программой TNMR. Магнит состоял из двух постоянных магнитов размером 60x80x100 мм, соединённых U-образным

магнитопроводом, с зазором в 25 мм. Индукция магнитного поля в зазоре 300 мТл. Неоднородность магнитного поля в месте расположения катушки с образцом 0.1 мТл/см. Размеры рабочей катушки датчика: D=5,5 мм, L=12 мм. При определении распределения времен T_1 применялась серия импульсов «инверсия-восстановление». При измерении времен T_2 использована серия импульсов CPMG.

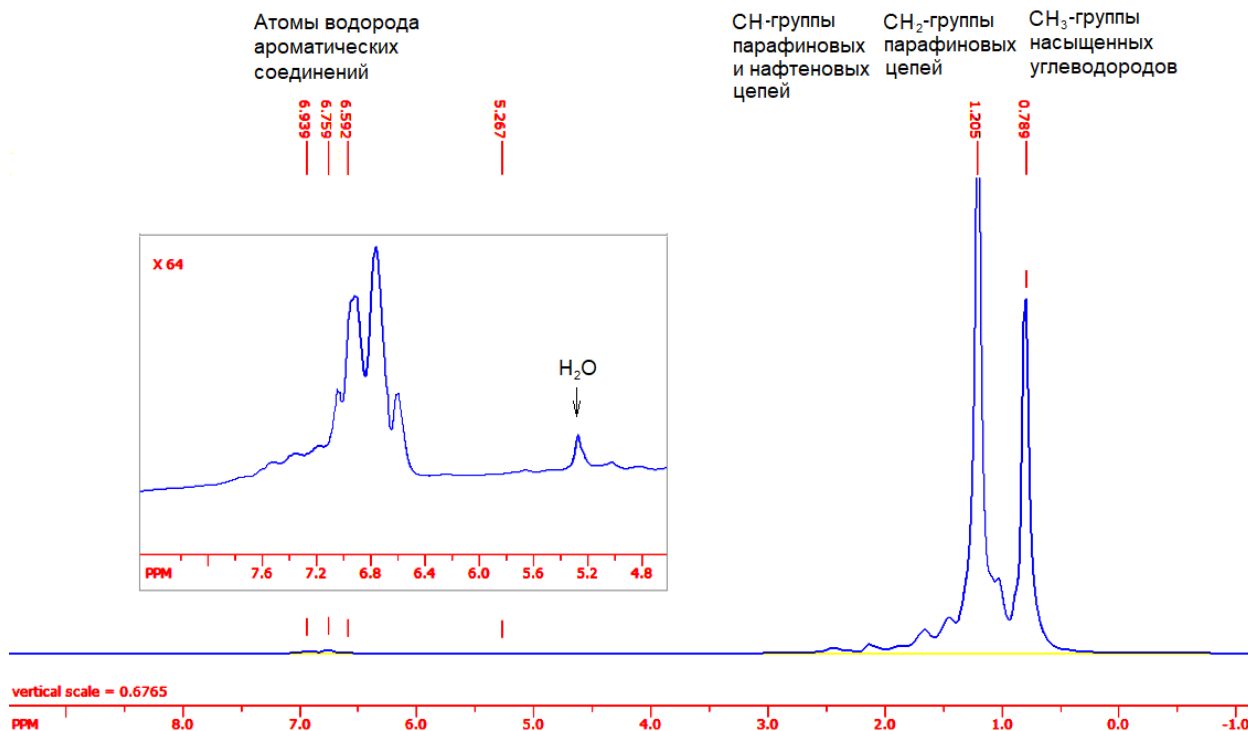


Рис. 2. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для базового масла SN-150.

Для стандартной импульсной последовательности Карра-Парцелла-Мейбума-Джилла CPMG, применяемой для измерения поперечной релаксации ЯМР-сигнал описывается выражением:

$$M(t) = \int_0^\infty f_2(T_2) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) dT_2, \quad (1)$$

где $M(t)$ – измеряемый сигнал, как функция времени. Для измерения продольной релаксации методом инверсии-восстановления сигнал можно представить выражением:

$$M(t) = \int_0^\infty f_1(T_1) \left[1 - k \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right)\right] dT_1, \quad (2)$$

где $k=2$ только для случая полной инверсии намагниченности первым р.-ч. импульсом, $f_1(T_1)$ и $f_2(T_2)$ – функции распределений времен релаксации. В работе исследованы следующие топлива и смазочные материалы: топливо бункеровочное

легкое, вид I (ТБЛ), судовое маловязкое топливо (СМТ), дизельное топливо Газпромнефть (ДТ), масло моторное для судовых двигателей ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (ТПЕО), базовое масло SN-150 (SN-150), базовое масло SN-500 (SN-500), масло моторное Castrol Magnatec 5W-30 синтетическое (CASTROL), автомобильное минеральное моторное масло Kutenkeuler 5W40 (KUTTENKEULER).

В отличие от твердых полимеров с двухфазным состоянием, где водород может содержаться в обеих фазах и обуславливать суммарный ЯМР – сигнал, здесь следует использовать экспоненциальный метод инверсии интегральных преобразований.

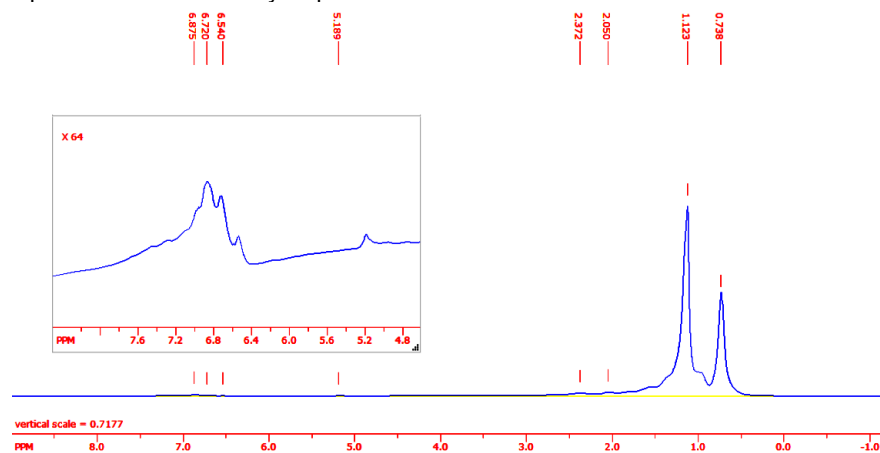


Рис. 3. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для базового масла SN-500

1. Результаты исследований и их анализ

Рис. 2-4 иллюстрируют спектры ЯМР ¹H в высоком поле, полученные на спектрометре Varian 400, для базовых масел SN-150 и SN-500 и дизельного топлива.

На спектрах видны линии от атомов водорода ароматических соединений, от CH – групп парафиновых и нафтеновых цепей, от группы CH₂ парафинов и от CH₃ – групп насыщенных

углеводородов. Эти спектры, как и спектры для СМТ [3] и других нефтепродуктов качественно подобны, отличаются интенсивностью и разрешением линий и для определения процентного содержания различных углеводородов в нефтепродуктах требуется интегрирование ЯМР - спектра в соответствующих интервалах химсдвигов.

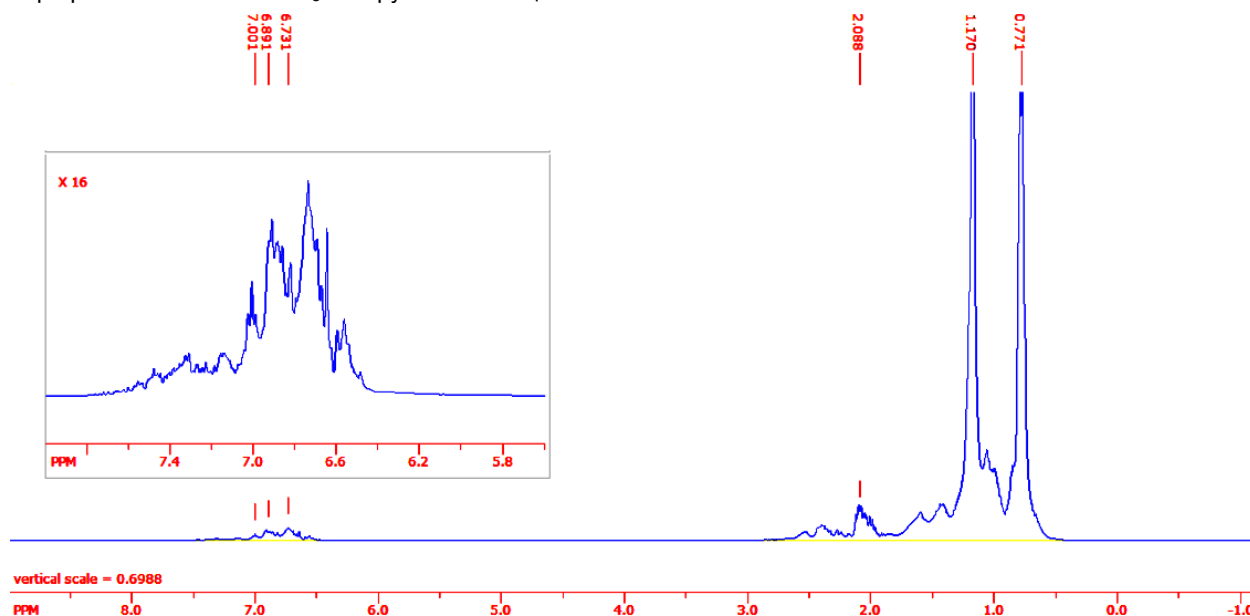


Рис. 4. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для дизельного топлива (ДТ).

На рис. 5 показан 2M – корреляционный (COSY) спектр ЯМР ¹H судового маловязкого топлива. Как видно по одномерным проекциям, спектр высокого разрешения для этого топлива качественно близок к спектрам других исследованных продуктов. В спектрах COSY кросс-пики (недиагональные сигналы на 2M – топограмме) появляются при наличии спин-спинового взаимодействия. Такие связи, как видно из рис. 5 существуют между протонами CH₂ – групп парафиновых цепей и CH₃ – групп насыщенных углеводородов. Известно, что 2M – эксперимент в ЯМР требует значительных затрат времени (до суток).

Распределение времен релаксации ЯМР протонов, полученные методом инверсии интегрального преобразования для судового топлива ТБЛ, масел ТПЕО, CASTROL и KUTTENKEULER показаны на рис. 6.

Распределения времен T₁ бимодальны и расположения пиков отличаются для всех образцов. Для топлива ТБЛ времена релаксации существенно более длинные по сравнению с маслами. Прослеживается также корреляция между временами релаксации и вязкостью. Чем выше вязкость продукта, тем меньше значения времен релаксации T₁ и T₂. Как видно из рис. 6, распределения времен релаксации для исследованных образцов отличаются одно от другого, что позволяет их использовать в качестве характеристики продукта. В распределении времен релаксации T₂ для свежего масла ТПЕО наблюдается 3 пика. Традиционные методы измерения времен релаксации T₂ с использованием аппроксимации спада поперечной намагниченности одной-двумя экспонентами [5] не позволили бы корректно описать релаксацию в этом продукте.

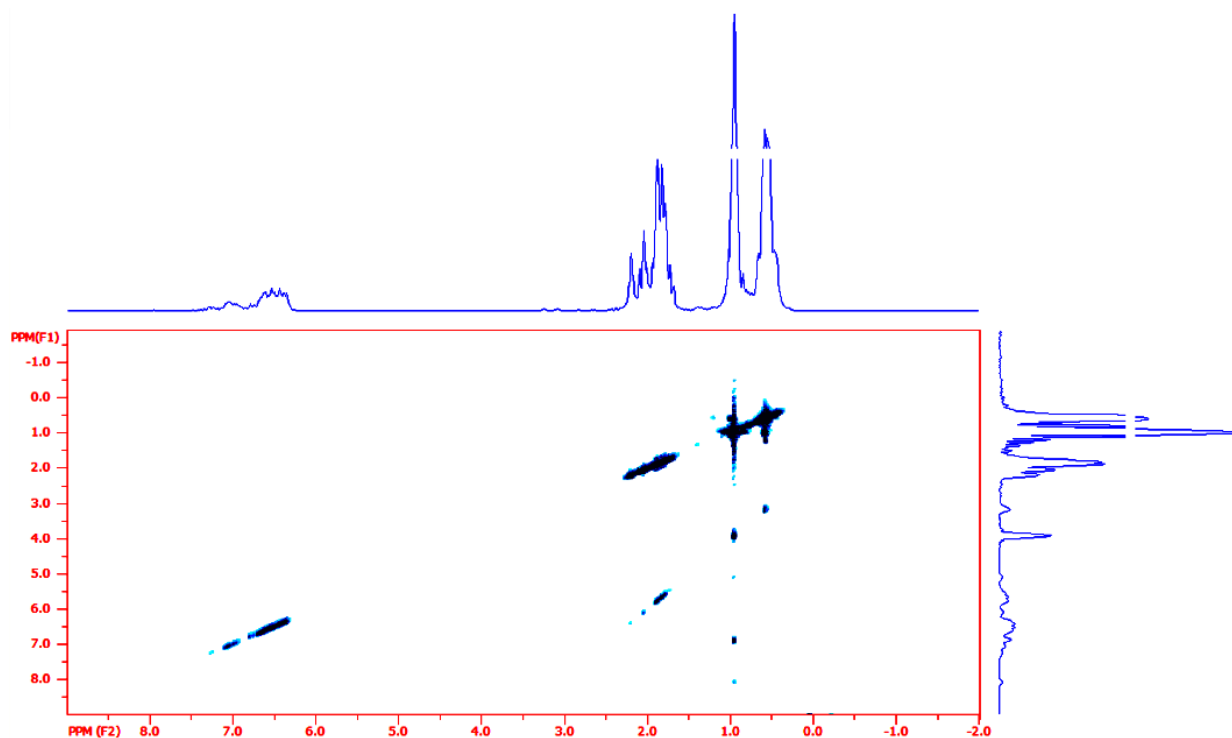


Рис. 5. 2М корреляционный спектр COSY для СМТ

Скорости релаксации у разных нефтепродуктов обусловлены сложным составом углеводородов. Макромолекулы обладают отличающейся структурой и динамическими свойствами, что и является причиной различия скоростей релаксации и модальности их распределений. Наличие в маслах и топливах углеводородов с отличающейся молекулярной массой и подвижностью молекул обуславливает бимодальность (мультимодальность) распределений времен спин-решеточной релаксации T_1 . Тяжелые молекулы дают короткие компоненты T_1 , а легкие - длинные.

Моторное масло является сложной молекулярной системой. Положения пиков на распределениях зависят не только от состава углеводородов, но и от наличия и видов присадок, улучшающих те, или иные свойства масла.

У отработанного судового масла ТПЕО (рис.7) все три пика на распределении времен релаксации T_2 сдвигаются по сравнению со свежем маслом в сторону более длинных времен. На распределении

времен релаксации T_1 основной пик находится в коротковременной области и для отработанного масла не сдвигается по отношению к основному пику для свежего масла.

Кривые «с» на распределениях времен T_1 и T_2 получены для искусственно состаренного масла ТПЕО путем его окисления нагреванием при 85°C в течение 25 часов. Можно заметить, что распределение времен релаксации T_2 для этого масла никак не меняется по сравнению со свежем маслом. В то же время оба пика на распределении времен релаксации T_1 для подверженного искусственному окислению масла сдвигаются: основной пик в коротковременную область, а небольшой пик с длинным временем релаксации смещается еще дальше в длинновременную область. Такое отличие в изменениях распределений времен T_1 и T_2 свидетельствует о том, что изменения в отработанном масле не сводятся просто к окислению при высокой температуре, а определяются и другими факторами.

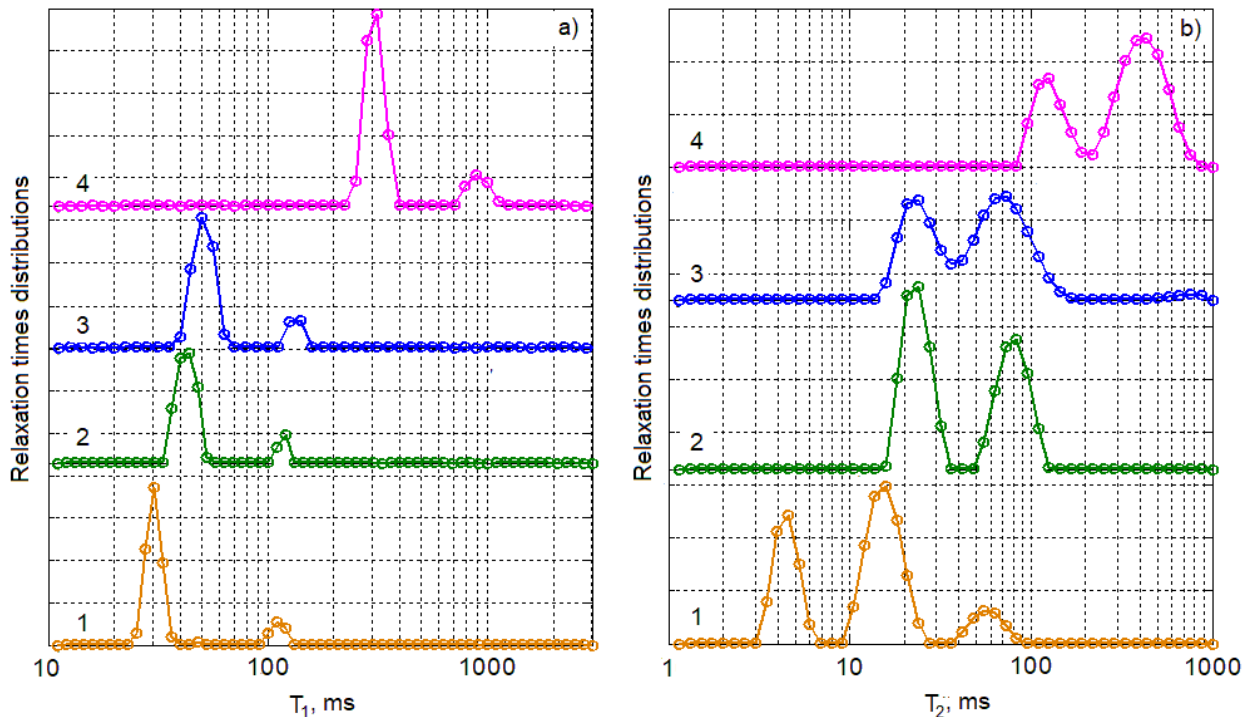


Рис. 6. Распределение времен релаксации T_1 (a) и T_2 (b) для: 1 –масло ТПЕО, 2- масло KUTTENKEULER, 3 - синтетическое масло CASTROL, 4- топливо ТБЛ.

Иначе меняются распределения времен релаксации T_1 и T_2 для автомобильного масла KUTTENKEULER после его отработки в двигателе при пробеге 10 тыс. км (рис. 8). Оба пика в

распределении времен T_2 сдвигаются в коротковременную область, в то время как пики в распределении T_1 смещаются в длинновременную область.

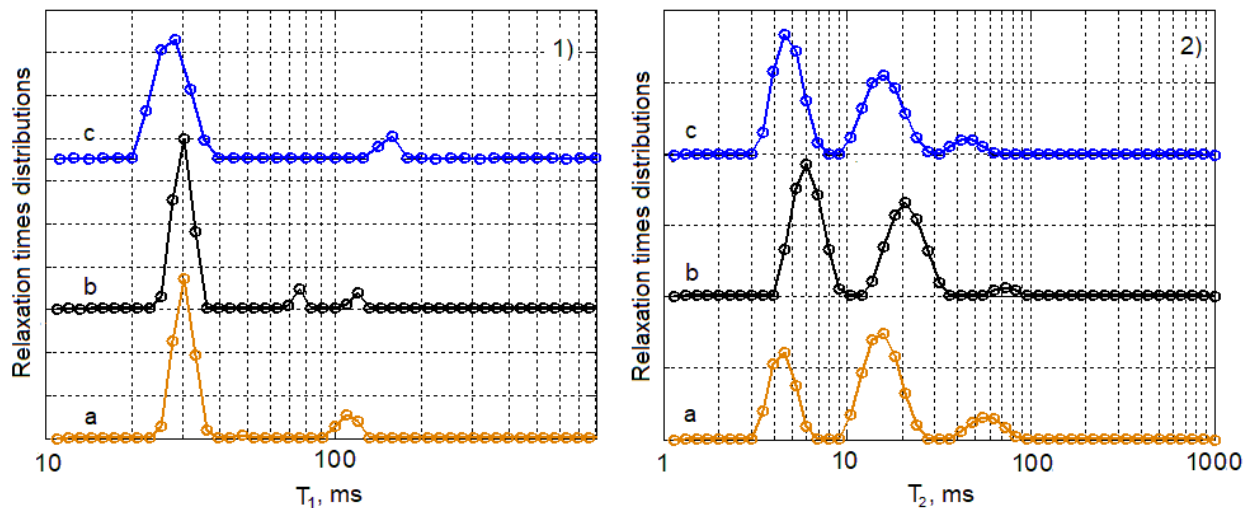


Рис. 7. Распределение времен релаксации T_1 (1) и T_2 (2) для масла ТПЕО свежего (a), масла ТПЕО, отработанного в течение 300 час. (b) и масла ТПЕО свежего после его выдержки при температуре 85°C в течение 25 час. (c).

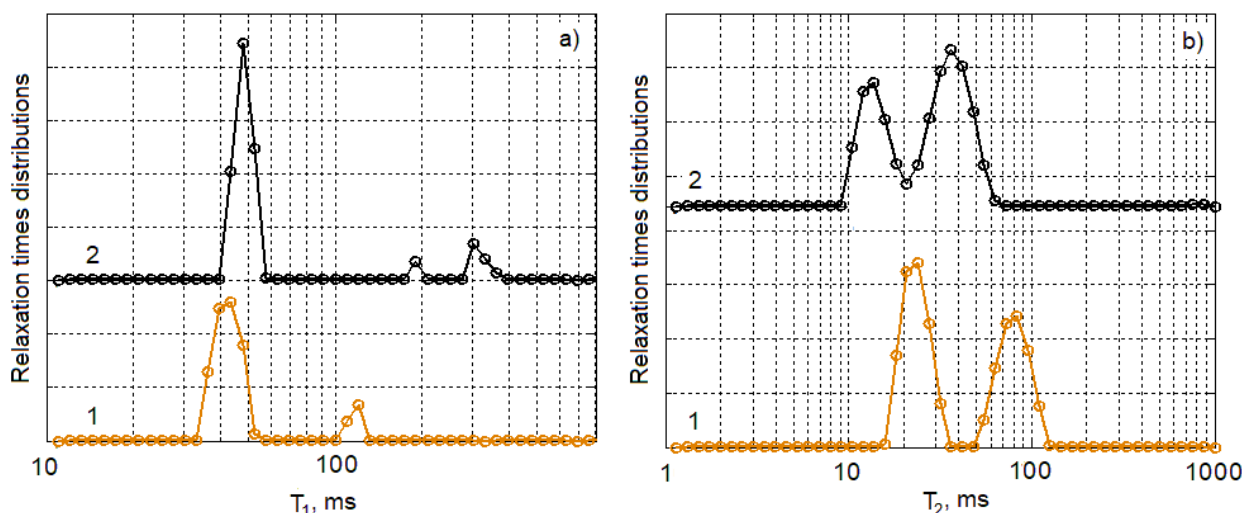


Рис. 8. Распределение времен релаксации T_1 (a) и T_2 (b) для масла KUTTENKEULER свежего (1) и для того же масла после 10 тыс. км пробега. (2).

Можно предположить, что уменьшение времен релаксации T_2 в отработанном масле связано с тем, что времена релаксации протонов очень чувствительны к наличию в жидкостях ферромагнитных частиц, появляющихся в масле в процессе работы двигателя. Вблизи этих частиц локальные магнитные поля изменяются, что приводит к уменьшению времени релаксации спинов протонов молекул масла.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод о значительном отличии распределений времен релаксации для всех исследованных нефтепродуктов, что может быть использовано для их идентификации и тестирования качества. В качестве практического применения результатов настоящей работы следует рекомендовать использование ЯМР релаксометрии протонов в низком магнитном поле с инверсией

преобразования Лапласа для идентификации и анализа качества судовых топлив и смазочных материалов. Для проведения такого экспресс-анализа не потребуется сложного и дорогостоящего оборудования и больших затрат времени, а достаточно компактных ЯМР релаксометров типа *NMR mouse* [6] и *Laptop NMR*.

Распределение времен релаксации ЯМР однозначно характеризуют вид и марку топлива или масла, может служить своего рода паспортом продукта, позволяет его идентифицировать, обнаруживать изменение состава топлив и масел, вызванное химическими реакциями и примесями.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству Российской Федерации (НИОКТР ААА-А18-118040690124

Литература

1. Щагин В.В., Двойрис Л.И. Старение и очистка дизельных масел. Калининград: Калининградское книжное издательство, 1971. 200 с.
2. Синявский Н.Я., Мершиев И.Г. Исследование судовых горюче-смазочных материалов с помощью ЯМР релаксометрии с целью контроля качества // Морские интеллектуальные технологии. 2017. 37(3). С. 62-66.
3. Синявский Н.Я., Корнева И.П. Исследование возможностей инверсии интегральных преобразований в релаксометрии ЯМР полимеров судового оборудования // Морские интеллектуальные технологии. 2017. 38(4). С. 196-201.
4. Marino I.-G. (2004) / Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> (дата обращения 12.11.2018).
5. Марусина М. Я., Неронов Ю. И. Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования // Научное приборостроение. 2010. 20(2). С. 37-41.
6. Blümich V., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p. eferences
7. Shchagin V.V., Dvoiris L.I. Aging and cleaning of diesel oils, Kaliningrad book publishing house, Kaliningrad, 1971. 200 p.
8. Sinyavsky N.Ya., Mershiev I.G. (2017). Study of marine fuels and lubricants using NMR relaxometry for the purpose of quality control. Marine Intelligent Technologies, 37(3), 62-66 c.
9. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P. (2017). Investigation of the possibilities of inversion of integral transformations in relaxometry of NMR polymers of ship equipment. Marine Intelligent Technologies, 38(4), 196-201 c.
10. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].

11. Marusina M. Ya., Neronov Yu. I. (2010). Method for determining the relaxation time of protons of motor oil and the possibility of its practical use. *Nauchnoe priborostroenie*, 20(2), 37-41/
12. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. *Compact NMR*. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.

References

1. Shchagin V.V., Dvoiris L.I. *Starenie i ochildka dizel'nyh masel*. Kaliningrad: Kaliningradskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1971. 200 p.
2. Sinyavskij N.YA., Mershiev I.G. *Issledovanie sudovyh goryuche-smazochnyh materialov s pomoshch'yu YAMR relaksometrii s cel'yu kontrolya kachestva Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. 37(3). Pp. 62-66.
3. Sinyavskij N.YA., Korneva I.P. *Issledovanie vozmozhnostej inversii integral'nyh preobrazovanij v relaksometrii YAMR polimerov sudovogo oborudovaniya. Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. 38(4). S. 196-201.
4. Marino I.-G. (2004). *EHlektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m>* (data obrashcheniya 12.11.2018).
5. Marusina M. YA., Neronov YU. I. *Metod opredeleniya vremeni relaksacii protonov motornogo masla i vozmozhnosti ego prakticheskogo ispol'zovaniya. Nauchnoe priborostroenie*. 2010. 20(2). Pp. 37 41.
6. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. *Compact NMR*. Berlin. Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.
7. Shchagin V.V., Dvoiris L.I. *Aging and cleaning of diesel oils*, Kaliningrad book publishing house, Kaliningrad, 1971. 200 p.
8. Sinyavsky N.Ya., Mershiev I.G. (2017). *Study of marine fuels and lubricants using NMR relaxometry for the purpose of quality control. Marine Intelligent Technologies*, 37(3), pp. 62-66.
9. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P. (2017). *Investigation of the possibilities of inversion of integral transformations in relaxometry of NMR polymers of ship equipment. Marine Intelligent Technologies*, 38(4), pp. 196-20.
10. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].
11. Marusina M. Ya., Neronov Yu. I. (2010). Method for determining the relaxation time of protons of motor oil and the possibility of its practical use. *Nauchnoe priborostroenie*, 20(2), pp. 37-41.
12. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. *Compact NMR*. Berlin.Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.

УДК 539.1.08; 621.892.84

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МОТОРНОГО МАСЛА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ЯМР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Николай Яковлевич Синявский

доктор физико-математических наук, профессор
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Аннотация

Целью данной работы явилось исследование свежего и отработанного судового масла методом ЯМР высокого разрешения ^1H и ^{13}C , а также методом релаксометрии ЯМР с инверсией преобразования Лапласа, сравнение возможностей обоих методов для характеристики изменений, происходящих с маслом в процессе эксплуатации судового дизеля. Публикации подобных исследований отсутствуют и результаты, приводимые в настоящей работе, обладают новизной.

При исследовании использовались методы ЯМР протонов и углерода в высоком поле, а также ЯМР-релаксометрия ядер ^1H в низком поле, последовательности импульсов «инверсия-восстановление» для измерения распределений времен T_1 , и последовательность CPMG для получения распределений времен T_2 . Для обращения интегрального преобразования применялся метод инверсии, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения и регуляризации (RILT).

Из спектров ЯМР ^1H и ^{13}C высокого разрешения определено молярное содержание функциональных органических групп свежего и отработанного моторного масла для судовых двигателей ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40. Установлено, что распределения T_1 и T_2 существенно различаются для свежего и отработанного масла. Модальность распределений, интенсивности и координаты максимумов на распределениях зависят от состава разных углеводородов в составе масел.

Надежность полученных результатов подтверждается многократной апробацией и общим признанием эффективности метода ЯМР в разных областях науки. Предложено для оценки качества судовых моторных масел использовать метод ЯМР релаксометрии протонов и распределения времен спин-спиновой релаксации. Рекомендовано создание соответствующего малогабаритного прибора для контрольных измерений.

Ключевые слова: судовые масла, контроль качества, ЯМР, релаксометрия с инверсией преобразования Лапласа

INVESTIGATION OF CHANGES OF MOTOR OIL IN THE PROCESS OF OPERATION OF THE SHIP ENGINE BY HIGH-RESOLUTION NMR METHOD

Nikolay Ya. Sinyavskiy

Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Department of Physics and Chemistry of the Baltic State Fishing Fleet Academy
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Abstract

The purpose of this work was to study fresh and used ship oil using high resolution ^1H NMR and ^{13}C NMR, as well as the NMR relaxometry method with Laplace transform inversion, comparing the capabilities of both methods to characterize the changes that occur with oil during the operation of the ship diesel engine. There are no publications of such studies and the results given in this paper are novel.

High-field NMR of protons and carbons methods as well as ^1H -low-field NMR relaxometry, the pulse sequence of "inversion-recovery" to measure the distributions of times T_1 , and a CPMG sequence to obtain distributions of times T_2 were used in the study. An inversion method based on minimizing the root-mean-square deviation and regularization (RILT) was applied to reverse the integral transformation.

The molar content of functional organic groups of fresh and used engine LUKOIL NAVIGO TPEO 15/40 oil for marine engines was determined from the ^1H and ^{13}C NMR spectra of high resolution. It was found that the distributions of T_1 and T_2 differ significantly for fresh and used oil. The modality of

the distributions, the intensities and coordinates of the maxima on the distributions depend on the composition of different hydrocarbons in the composition of the oils.

The reliability of the obtained results is confirmed by multiple approbations and a general recognition of the effectiveness of the NMR method in various fields of science. It has been proposed to use the method of NMR relaxometry of protons and the distribution of spin-spin relaxation times to evaluate the quality of ship motor oils. It is recommended to create an appropriate small-sized device for control measurements.

Key words: ship oils, quality control, NMR, relaxometry with Laplace transform inversion

Введение

Технический ресурс, надежность и экономичность судовых двигателей во многом определяется качеством используемых масел. Изучение процессов, приводящих к изменению физико-химических свойств, имеет большое значение для продления сроков эксплуатации судовых двигательных установок. Оценка качества масел выполняется в условиях специализированных лабораторий и предполагает определение нескольких основных характеристик. Отработанное масло темнеет, изменяет вязкость, кислотность, молекулярный вес, в нем появляются механические примеси.

Изучению связи между изменением основных физико-химических характеристик масел и износом деталей посвящено достаточно много публикаций [1]. Вместе с этим, результаты этих исследований являются достаточно противоречивыми. Ситуация осложняется большим разнообразием масел и используемых для улучшения его качества присадок.

Свойства нефтепродуктов анализируются разными физическими и химическими методами, в том числе методами радиоспектроскопии. Эти методы, однако, являются достаточно сложными, дорогостоящими и длительными по времени. В работе [2] для экспресс-анализа нефтепродуктов нами был предложен метод ЯМР-релаксометрии с инверсией преобразования Лапласа. С использованием ЯМР низкого поля определены распределения времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации T_1 и T_2 для судового маловязкого топлива, дизельного топлива, мазута М-100 и базовых масел SN-150 и SN-500. Характер распределений для разных нефтепродуктов существенно различается, что объясняется разным содержанием множества углеводородов в их составе. В статье [3] приведен спектр ЯМР протонов высокого разрешения для дизельного топлива СМТ и разработанный алгоритм обобщенной инверсии интегрального преобразования для нахождения распределения времен релаксации.

В публикации [4] для оценки длительности службы моторных масел и контроля степени износа двигателя предложен метод определения времени спин-спиновой релаксации ЯМР протонов.

Целью данной работы явилось исследование свежего и отработанного судового масла ТПЕО 15/40 методом ЯМР высокого разрешения ^1H и ^{13}C , а также методом релаксометрии ЯМР с инверсией преобразования Лапласа, сравнение возможностей обоих методов для характеристики изменений, происходящих с маслом в процессе эксплуатации судового дизеля.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Спектры ЯМР высокого разрешения водорода и углерода были измерены на спектрометре Varian 400 в лаборатории Балтийского федерального университета им. И. Канта и обработаны с помощью программы SpinWorks. Измерения скоростей релаксации ЯМР протонов выполнены в низком магнитном поле на частоте 13.65 МГц на ЯМР-ЯКР спектрометре Testmag Apollo и обработаны с помощью программы TNMR. Для определения распределения времен спин-решеточной релаксации T_1 применялась стандартная последовательность импульсов «инверсия-восстановление». Для получения распределения времен спин-спиновой релаксации T_2 использовалась последовательность Карра-Парселла-Мейбума-Джилла.

В качестве объекта исследования были взяты образцы моторного масла для судовых двигателей ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 СТО 001486636-012-2008 с изм. 1-5, предназначенного для смазывания среднеоборотных тронковых судовых двигателей с циркуляционной или комбинированной системой смазки, при работе на высокосернистом топливе. Исследуемые образцы представляют собой однофазные системы поэтому в работе использовался многоэкспоненциальный метод инверсии интегральных преобразований по алгоритму [5].

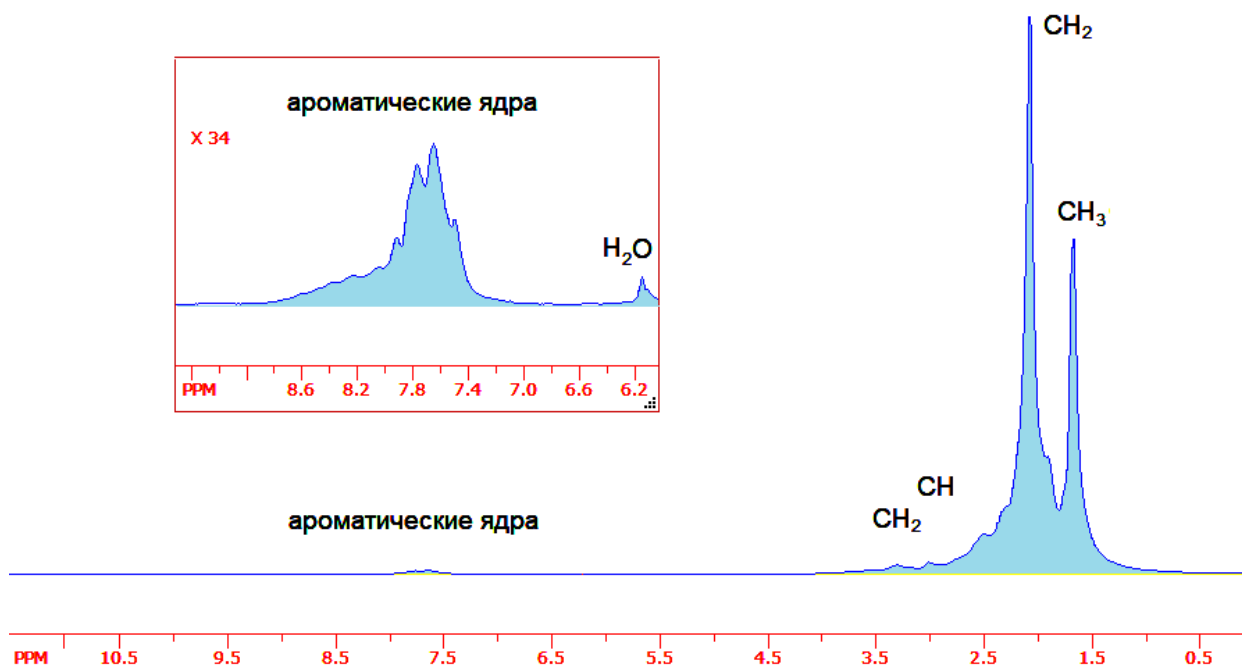


Рис. 1. Спектр ЯМР ^1H (400 МГц) образца свежего судового масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (сигналы ароматических протонов увеличены в 34 раза)

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Рис. 1-2 иллюстрируют спектры ЯМР ^1H высокого разрешения, полученных для свежего и отработанного в течении 300 часов масел ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40, соответственно. На спектрах наблюдаются линии от атомов водорода ароматических соединений, от СН – групп парафиновых и нафтеновых цепей, от групп CH_2 парафинов и от CH_3 – групп насыщенных углеводородов. Оба эти спектра (рис. 1-2), как и спектры других нефтепродуктов качественно подобны и отличаются только интенсивностью, шириной и разрешением линий. Для определения количественного состава функциональных органических групп образцов было выполнено интегрирование спектров в соответствующих областях. Молярное содержание функциональных органических групп образцов свежего и отработанного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40, по данным ЯМР ^1H (400 МГц) сведено в таблицу 1.

Области сигналов протонов алифатических групп спектров ЯМР ^1H для свежего и отработанного масел приведены на рис. 3. Увеличение ширины линий у отработанного масла обусловлено изменением его вязкости и плотности, а также тем, что в процессе работы двигателя в масле

появляются ферромагнитные частицы, изменяющие локальные магнитные поля.

Как видно из табл. 1, в отработанном масле существенно повышается содержание воды, у алифатических углеводородов почти в половину уменьшается молярное содержание органических групп CH_2 и примерно в 2 раза увеличивается содержание CH_3 – групп. Почти в 3 раза в отработанном масле увеличивается содержание атомов водорода ароматических соединений H_{ar} . Спектры ЯМР ^{13}C высокого разрешения приведены на рис. 4-5. По сравнению со спектрами протонов эти спектры имеют существенно более высокую мультиплетность. Линии спектра отработанного масла уширяются незначительно. Соотношение между интенсивностями линий в спектрах практически не меняется. Молярное содержание функциональных органических групп образцов свежего и отработанного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 по данным ЯМР ^{13}C (100 МГц) приведены в табл. 2. Как видно из таблицы содержание ароматических углеводородов у отработанного масла увеличилось по сравнению со свежим маслом. Произошло также перераспределение между молярным содержанием функциональных органических групп СН, CH_2 и CH_3 алифатических углеводородов.

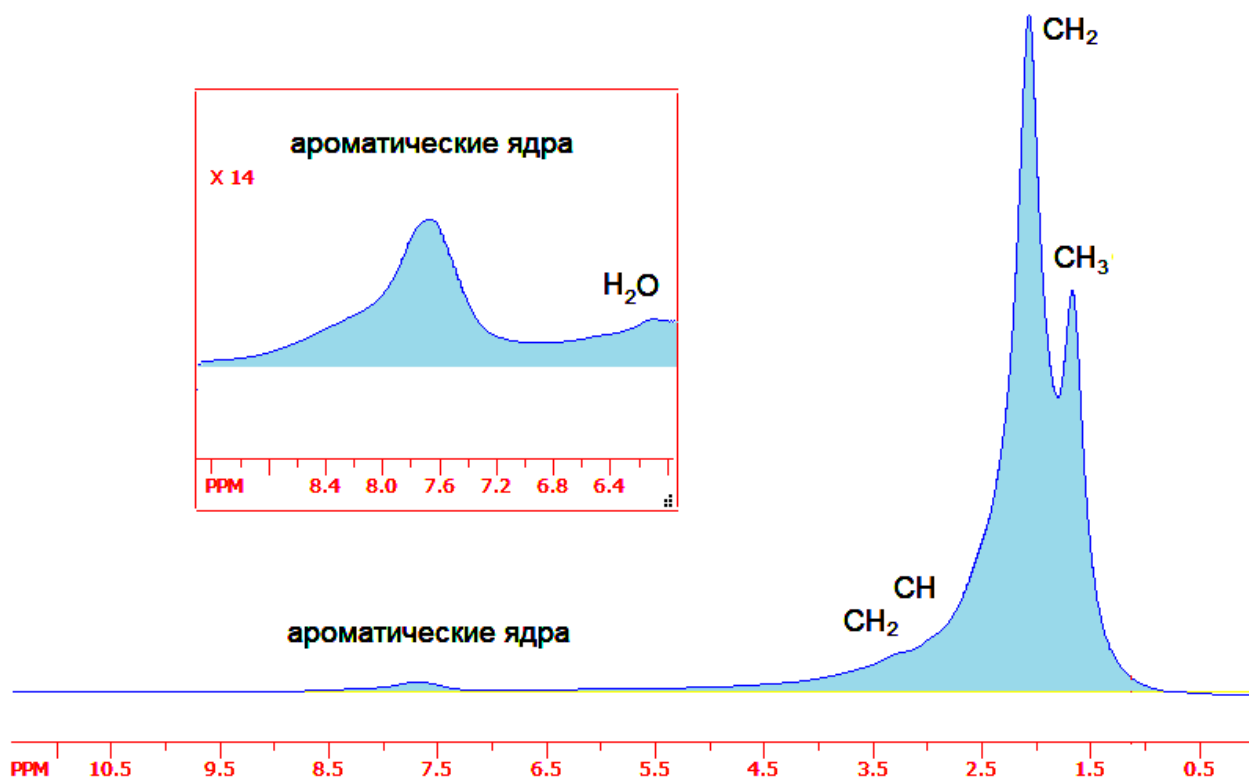


Рис. 2. Спектр ЯМР ^1H (400 МГц) образца отработанного (400 час.) судового масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (сигналы ароматических протонов увеличены в 14 раз)

Старение моторного масла происходит в результате процессов окисления, разложения и термической полимеризации углеводородов, что и приводит к изменению молярного содержания функциональных

органических групп. Окисляется масляная пленка при контакте с нагретыми частями цилиндра и других деталей. Это приводит к лакообразованию и закоксованности.

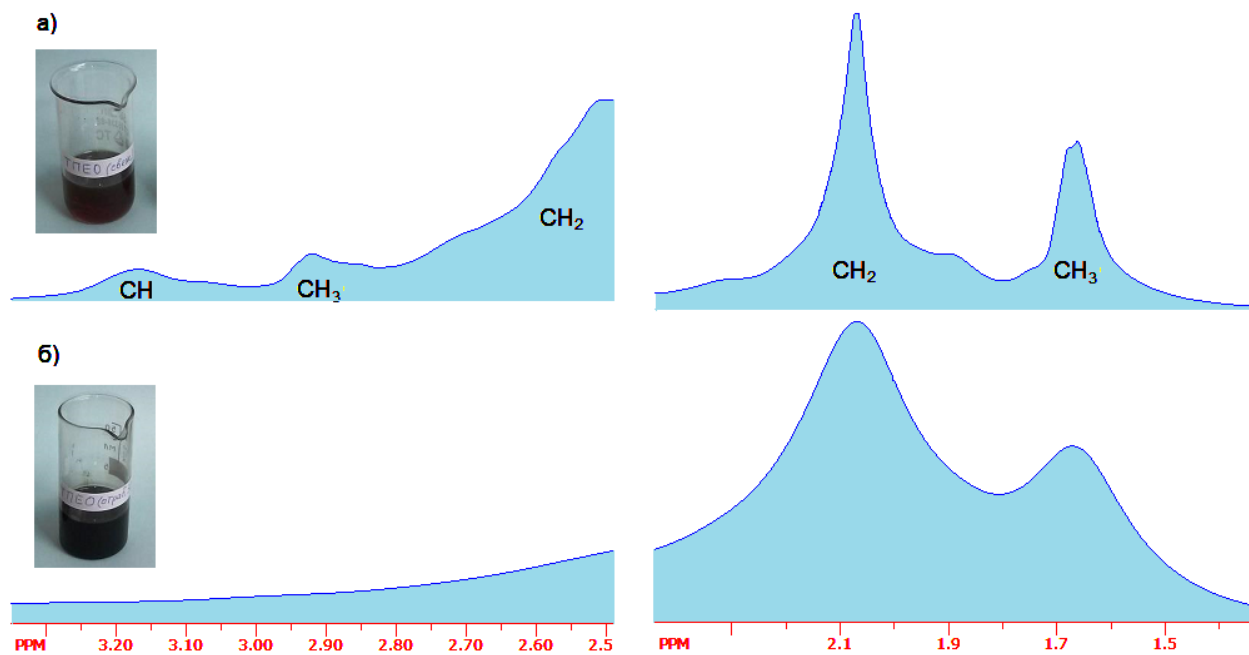


Рис. 3. Спектр ЯМР ^1H (400 МГц). Область сигналов протонов алифатических групп: ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 свежее (а) и отработанное (б)

Таблица 1

Молярное содержание функциональных органических групп образцов свежего и отработанного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40, данные по ЯМР ¹H (400 МГц)

Образец	H _{ар}	CH ₂	CH	CH ₃	H ₂ O
ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (свежее)	1.2%	66.2%	1.5%	29.1%	0.06%
ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (отработанное)	3.4%	27.9%	2.2%	62.1%	2.8%

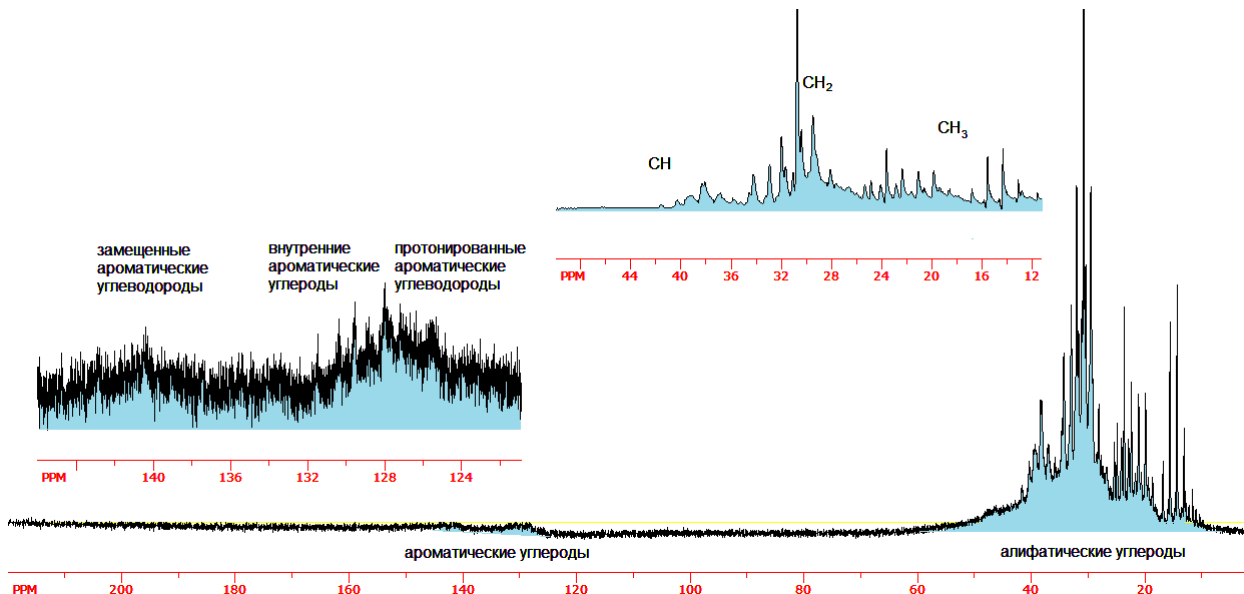


Рис. 4. Области атомов углерода в спектрах ЯМР ¹³C (100 МГц) свежего масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40.

Времена продольной и поперечной релаксации в ЯМР несут информацию о временах корреляции различных молекулярных движений. Измерения скорости спин-спиновой и спин-решеточной

релаксации дают возможность их соотнести к соответствующим движениям и являются надежным и быстрым методом ЯМР при оценке свойств материалов [6].

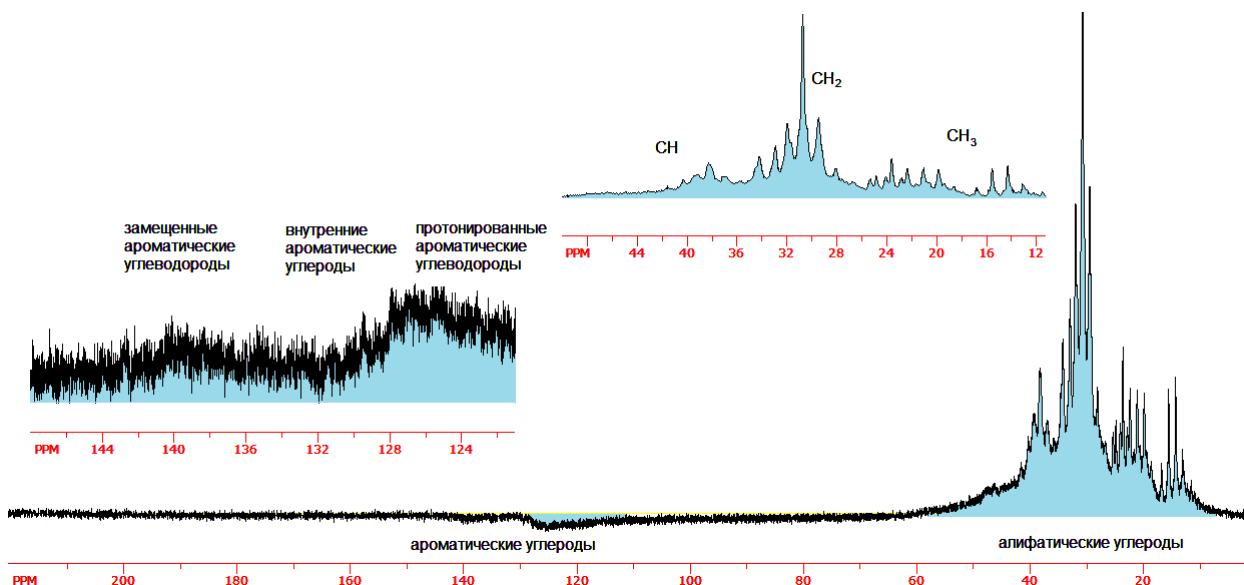


Рис. 5. Области атомов углерода в спектрах ЯМР ¹³C (100 МГц) отработанного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40

Результаты исследования распределения времен релаксации T₁ и T₂ в судовом моторном масле ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 иллюстрирует рисунок 6. Видно, что распределения времен

релаксации отличаются друг от друга. В распределениях времен спин-спиновой релаксации масла наблюдаются три пика. Значения времен релаксации определяются соотношением разных

углеводородов. Эти углеводороды имеют разную структуру, молекулярную массу и динамику молекул и их частей, что и определяет скорости релаксации и сложность их распределений. Разная подвижность молекул обуславливает и мультимодальность распределений времен спин-решеточной

релаксации. Тяжелые молекулы дают короткие значения T_1 , а легкие – длинные. Положения пиков на распределениях зависят не только от состава углеводородов, но и от наличия и видов присадок, улучшающих те, или иные свойства масла.

Таблица 2

Молярное содержание функциональных органических групп образцов свежего и отработанного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40, данные по ЯМР ^{13}C (100 МГц)

Образец	Замещенные ароматические углеводороды	Внутренние ароматические углеводороды	Протонированные ароматические углеводороды	СН	СН ₂	СН ₃
ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (свежее)	1.2%	0.4%	1.7%	12.7%	60.2%	21.8%
ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (отработанное)	2.8%	0.05%	1.5%	19.3%	65.6%	10.0%

У отработанного судового моторного масла все три пика на распределении времен релаксации T_2 сдвигаются по сравнению со свежим маслом в сторону более длинных времен. Это может свидетельствовать о уменьшении молекулярного веса и увеличении подвижности некоторых

углеводородов. На распределении времен релаксации T_1 для отработанного масла основной пик находится в коротковременной области и не сдвигается по отношению к основному пику для свежего масла.

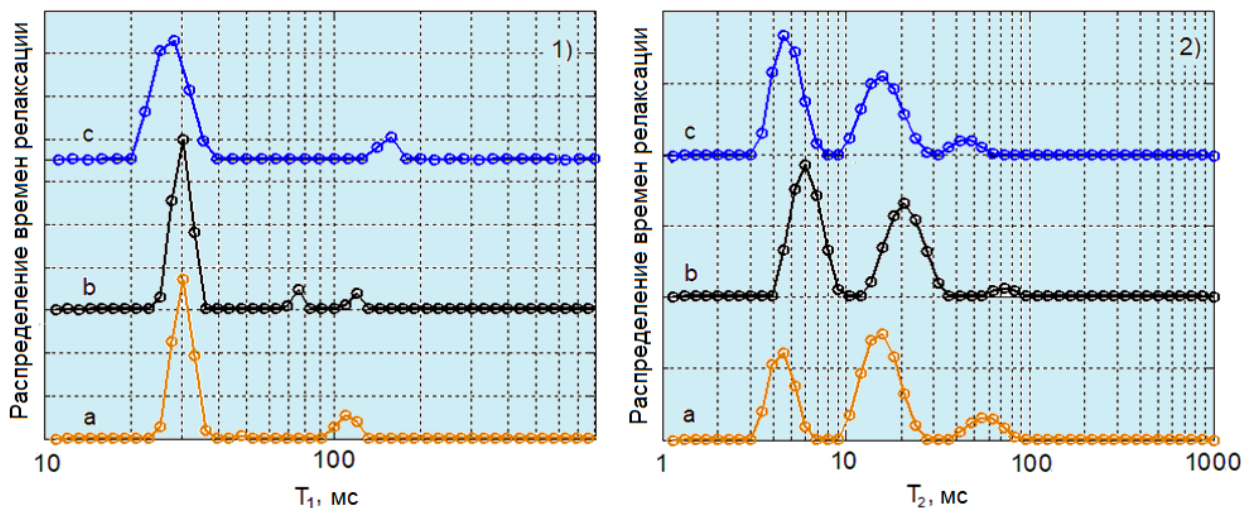


Рис. 6. Распределение времен релаксации T_1 (1) и T_2 (2) для масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 свежего (а), масла, отработанного в течение 300 час. (b) и масла свежего после нагрева в течение 25 час. при температуре 85°C (с).

Кривые «с» на распределениях T_1 и T_2 (рис. 6) получены для искусственно состаренного масла путем его окисления нагреванием при 85°C в течение 25 часов. Видно, что распределение времен релаксации T_2 для этого масла никак не меняется по сравнению со свежим маслом. В то же время оба пика на распределении времен релаксации T_1 для подверженного искусственному старению масла сдвигаются: основной пик в коротковременную область, а небольшой пик с длинным временем релаксации смещается еще дальше в длинновременную область. Такая разница в изменениях распределений времен T_1 и T_2 свидетельствует о том, что изменения в отработанном масле не сводятся только к окислению при высокой температуре, а определяются и другими факторами.

Заключение

В работе экспериментально исследованы методом ЯМР высокого разрешения ^1H и ^{13}C образцы свежего и отработанного судового моторного масла ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40. Из многоэкспоненциальных спадов ядерной намагниченности определены распределения времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации ядер водорода. По данным ЯМР ^1H и ^{13}C определено молярное содержание функциональных органических групп, являющихся характеристиками нефтепродуктов и определяющие многие их технические характеристики. Однако, для контроля качества судового моторного масла, как и различные варианты химического анализа, метод ЯМР высокого разрешения требует наличия сложного и дорогостоящего оборудования,

значительных затрат времени, особенно для ЯМР изотопа ^{13}C , имеющего низкое природное содержание (1.1%).

Методом релаксометрии низкого поля установлено, что полученные распределения времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации отличаются для свежего, отработанного и искусственно состаренного масел. Анализируя распределения времен релаксации, можно предположить, что интенсивность пиков в распределениях, их положение и количество определяются молярным содержанием функциональных органических групп углеводов. Времена продольной релаксации T_1 и поперечной релаксации T_2 содержат информацию о временах корреляции молекулярных движений макромолекул углеводов и их функциональных групп. Используемый в работе анализ многоэкспоненциального распада сигнала ЯМР

позволяет соотнести скорости релаксации к различным типам молекул и молекулярных фрагментов. По виду распределения времен релаксации можно реализовать диагностику качества моторного масла. Распределение времен релаксации T_2 позволяет обнаруживать изменение качества масла в процессе работы двигателя. Это позволяет предложить создание компактного ЯМР релаксометра с функцией инверсии преобразования Лапласа для идентификации и определения качества судовых моторных масел.

Благодарности. Исследования выполнены с финансовой поддержкой Федерального агентства по рыболовству Российской Федерации (номер проекта ААА-А18-118040690124-4). Автор благодарит И.Г. Мершиева из БФУ им. И. Канта за измерения спектров ЯМР высокого разрешения образцов.

Литература

1. Русаков С. М. Исследование и разработка методов и средств оперативного контроля состояния моторных масел в судовых дизельных установках. Дисс. на соиск. уч. степени кандидата технических наук, Калининград, 2000, 206 с.
2. Синявский Н.Я., Мершиев И.Г. (2017). Исследование судовых горюче-смазочных материалов с помощью ЯМР релаксометрии с целью контроля качества. Морские интеллектуальные технологии, 37(3), 62-66
3. Синявский Н.Я., Корнева И.П. (2017). Исследование возможностей инверсии интегральных преобразований в релаксометрии ЯМР полимеров судового оборудования. Морские интеллектуальные технологии, 38(4), 196-201
4. Марусина М. Я., Неронов Ю. И. (2010). Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования. Научное приборостроение, 20(2), 37–41
5. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Электронный ресурс].
6. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.

References

1. Rusakov S.M. Research and development of methods and means for operational control of the state of engine oils in marine diesel engines. Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, Kaliningrad, 2000, 206 p.
2. Sinyavsky N.Ya., Mershiev I.G. (2017). Study of marine fuels and lubricants using NMR relaxometry for the purpose of quality control. Marine Intelligent Technologies, 37 (3), 62-66
3. Sinyavsky N.Ya., Korneva I.P. (2017). Investigation of the possibilities of inversion of integral transformations in relaxometry of NMR polymers of ship equipment. Marine Intelligent Technologies, 38 (4), 196-201
4. Marusina M. Ya., Neronov Yu. I. (2010). Method for determining the relaxation time of protons of motor oil and the possibility of its practical use. Nauchnoe priborostroenie, 20 (2), 37-41
5. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].
6. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin.Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

УДК 621.316.92: 629.5.062

**ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ НА
ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ****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

Максим Сергеевич Харитонов

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1

Аннотация

В настоящее время прослеживается тенденция к внедрению судового электрооборудования на основе полупроводниковых преобразовательных устройств. Современные преобразователи в составе частотно-регулируемых электроприводов, устройств плавного пуска, светодиодных источников света являются для судовой системы нелинейной электрической нагрузкой. Их работа связана с искажением синусоидальности напряжения. В условиях постоянного роста применения силовой полупроводниковой техники на судах возникает задача оценки ее влияния на технические средства и обслуживающий персонал. При этом если вопросы электромагнитной совместимости достаточно подробно освещены в литературе, то воздействие современной полупроводниковой техники на показатели безопасности ранее не учитывалось. С учетом характерной для современных судов тенденции постоянного увеличения электробезопасности бортовых сетей, весьма актуальным представляется анализ влияния силовой полупроводниковой техники посредством искажения напряжения на электробезопасность в условиях судна.

Ключевые слова: электробезопасность, однофазные прикосновения, режим нейтрали, полупроводниковые преобразователи, качество электроэнергии, несинусоидальность,

**EFFECT OF MODERN SEMICONDUCTOR EQUIPMENT ON
ELECTROSAFETY OF SHIPBOARD ELECTRICAL POWER SYSTEMS****Ilya E. Kazhekin**

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: kazhekin@mail.ru

Maksim S. Kharitonov

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

Abstract

Currently, there is a trend towards introduction of shipboard electrical equipment based on semiconductor conversion devices. Modern converters as part of variable-frequency electric drives, soft starters, LED light sources are non-linear electrical loads for a ship system. Their work is associated with the distortion of the sinusoidal voltage. With the constant growth of the use of power semiconductor technology on ships, a problem arises of assessing its impact on equipment and maintenance personnel. Moreover, while electromagnetic compatibility issues are thoroughly expounded in literature, the impact of modern semiconductor devices on safety performance has not been previously taken into account. In light of the tendency towards a constant increase in electrical safety of onboard networks typical of modern vessels, it seems very relevant to analyze the influence of power semiconductor devices by distorting the voltage on electrical safety onboard a ship.

Key words: electrosafety, single-phase touches, neutral point connection, semiconductor converter, power quality, unsinusoidality

1. Электротравматизм на современном флоте

Предотвращение электротравматизма на объектах морской техники уже долгое время считается одной из наиболее важных и актуальных задач. Развитие флота постоянно сопровождается ростом относительных показателей потерь среди членов экипажей. При этом рост электроопасности обусловлен в том числе и заменой старых судов на новые, более насыщенные электрооборудованием.

Для современных объектов морской техники можно выделить следующие факторы, оказывающие влияние на электроопасность их бортовых электроустановок.

1. Использование электросетей переменного тока, для которых свойственно многократное увеличение проводимости изоляции по сравнению с ее уровнями в электроустановках постоянного тока. Увеличение проводимости изоляции обусловлено добавлением весьма значительной емкостной составляющей общей проводимости. Это, в свою очередь, приводит к резкому увеличению токов утечки через изоляцию и соответствующему повышению уровня опасности бортовых электроустановок [1].

2. Постоянный рост электрификации судов, который отражается в росте мощностей бортовых электросистем, связанным с необходимостью использования более производительного оборудования. Это привело к увеличению количества и мощности потребителей электроэнергии и соответствующему росту общей протяженности кабельных соединений и числа распределительных щитов в бортовых электросетях. В результате возросли величины фазных емкостей бортовых электроустановок и токи утечки на корпус.

3. Широкое внедрение современного электрооборудования на базе полупроводниковой техники, в частности, систем освещения и судового электропривода. С одной стороны, преобразовательная техника обеспечивает повышение энергоэффективности и безопасности судового электрооборудования, с другой - является нелинейной электрической нагрузкой, что сопряжено с эмиссией электромагнитных помех в судовую электрическую сеть, которые также оказывают влияние на безопасность.

Первые два фактора в литературе рассмотрены достаточно подробно, например в [1, 2]. Наиболее предпочтительным вариантом защиты от них можно признать изменение режима нейтрали, т.е. переход от изолированной к заземленной через реактор, что нашло отражение в Правилах Регистра [3]. При этом согласно предложенному в [4] подходу при обосновании преимуществ этого вида защиты нельзя не учитывать ее влияние и на другие факторы. Однако в литературе крайне мало внимания уделено анализу влияния третьего фактора, проявляющегося в искажении

синусоидальности напряжения сети, на электробезопасность. Восполнению этого пробела и посвящена работа.

2. Характеристики современной судовой полупроводниковой техники

Наиболее распространенными полупроводниковыми преобразователями на судах являются выпрямители электроприводов на основе двигателей постоянного тока и преобразователи частоты в электроприводах с асинхронными двигателями (рис. 1). В настоящее время на судах также получают распространение светодиодные источники света, имеющие встроенный полупроводниковый выпрямитель.

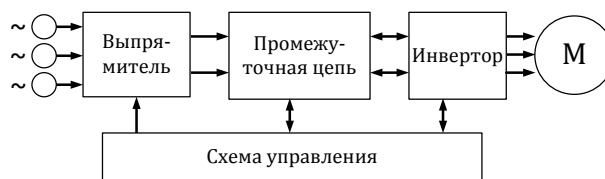


Рис. 1. Блок-схема преобразователя частоты

Наиболее часто на в судовых электросистемах используются следующие схемы выпрямления: для однофазных потребителей – двухполупериодная мостовая схема; для трёхфазных потребителей 6-пульсная схема выпрямления; 12-пульсные схемы используются в электроприводах наиболее мощных электродвигателей и в системах электродвижения. Гармонический состав потребляемого выпрямителями тока приведен на рис. 2.

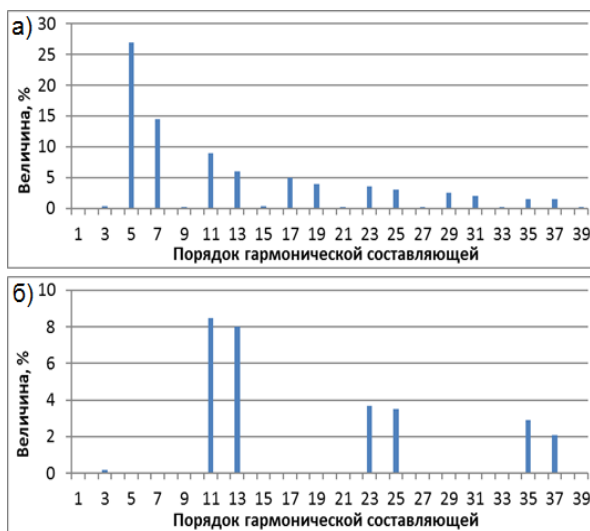


Рис. 2. Гармонический состав тока, потребляемого трехфазными выпрямителями с шести (а) и двенадцати (б) пульсовыми схемами

В светодиодных источниках света используются, преимущественно двухполупериодные выпрямители, несинусоидальность и гармонический состав входного тока которых в значительной степени зависит от реализованных производителем технических решений (рис. 3).

Нормы эмиссии кондуктивных электромагнитных помех относятся к вопросам качества электрической энергии. Требования к нормированию показателей качества электроэнергии можно оценить на основе анализа стандартов [5-7].

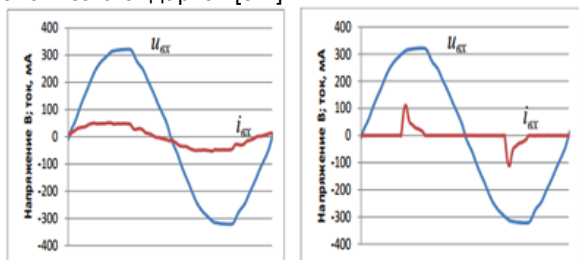


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на входе светодиодных ламп различных производителей

Несинусоидальность напряжения определяется двумя показателями: значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40 порядка K_{Uk} в процентах от напряжения основной гармонической составляющей U_1 (1); значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{Uк}$ (2):

$$K_{Uk} = \frac{U_k}{U_1} \times 100\%, \quad (1)$$

$$K_{Uк} = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2} \times 100\%.$$

(2)

Колебания напряжения в электрической сети приводят к возникновению фликера – явления субъективного восприятия колебаний светового потока источника света. Фликер характеризует биоэлектромагнитную совместимость световых приборов, их влияние на организм человека. Пульсации светового потока приводят к утомлению, снижению производительности труда, появлению ошибок при работе, росту доли так называемого «человеческого фактора» среди причин возникновения нештатных ситуаций. Поэтому искажение напряжения уже можно рассматривать как явление, способствующее возникновению однофазных прикосновений.

Экспериментальные исследования показателей КЭ на судне проводились в условиях стоянки при работе судовой ЭЭС от вспомогательного дизель-генератора с использованием анализатора КЭ Fluke 434 (рис. 4).

Нагрузка генератора по активной мощности на момент проведения измерений составляла 150 кВт. Основные потребители на момент измерений: осветительная нагрузка, электродвигатели системы вентиляции, оборудование камбуза. Измерения проводились в двух точках: на генераторном напряжении на шинах ГРЩ СШ 380В и на напряжении 220 В на линии от трансформатора Т1 к шинам ГРЩ СШ 220В.

Как видно из рис. 4 показатели КЭ в исследуемой ЭЭС при заданном режиме работы удовлетворяют требованиям Правил классификации и постройки

морских судов и ГОСТ 32144-2013 с учетом изолированного режима работы судовой ЭЭС.

Нагрузка генератора по активной мощности на момент измерений составляла 150 кВт. Основные потребители на момент измерений: осветительная нагрузка, электродвигатели системы вентиляции, оборудование камбуза. Измерения проводились в двух точках: на генераторном напряжении на шинах ГРЩ СШ 380В и на напряжении 220 В на линии от трансформатора к шинам ГРЩ СШ 220В.

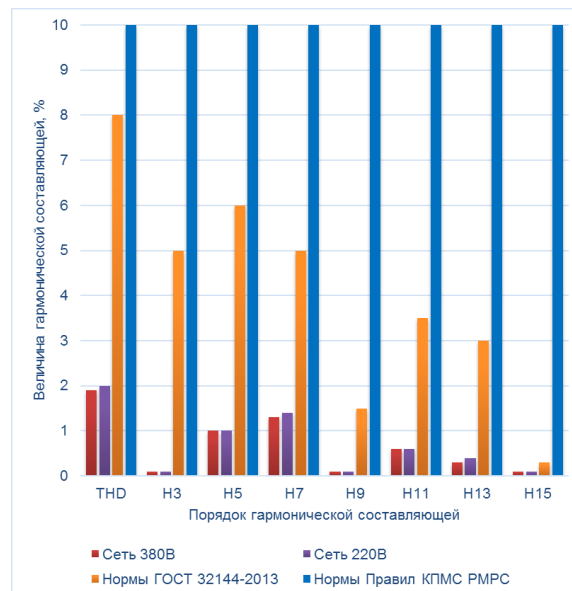


Рис. 4. Результаты измерений напряжения в судовых электросетях

При этом следует отметить, что доля нелинейных элементов в электроэнергетической системе исследуемого судна невелика. Например, потребление в сети 220 В осуществляется преимущественно освещением, где используются потолочные люминесцентные светильники накладного и встраиваемого исполнения с линейными лампами мощностью 2x18 Вт с электромагнитной пускорегулирующей аппаратурой (рис. 5).



Рис. 5. Структура нагрузок в сети с номинальным напряжением 220 В

На исследуемом судне номинальная мощность внутренних систем освещения составляет порядка 46,7 кВт, что соответствует 37% суммарной установленной мощности электрических нагрузок на напряжении 220 В.

3. Влияние несинусоидальности напряжения на электробезопасность судовых электроустановок

Известно, что электроопасность установок определяется величиной тока, протекающего через тело человека [8] при прикосновении к их неизолированным токопроводам. Следует отметить, что, согласно статистике [9], наиболее вероятным способом поражения человека электрическим током является прикосновения к одной из фаз электроустановки. Другие виды контакта человека с оголенными токопроводами маловероятны. Поэтому в дальнейшем анализ электроопасности бортовой электросистемы осуществляется исходя из величины тока однофазного прикосновения.

Влияние высших гармоник в напряжении на электроопасность бортовых электроустановок проявляется в следующем.

Во-первых, увеличивается напряжение смещения нейтрали в режиме работы электросистемы, когда прикосновение к фазе отсутствует. Увеличение этого напряжения способствует росту току через тело человека при его замыкании между фазой и корпусом судна.

Присутствие высших гармоник в напряжении зависит во многом от схемы соединения источников и потребителей, а именно режима заземления нейтрали электроустановки. В низковольтных электросистемах судов отечественной постройки согласно [3] допускается использование изолированной нейтрали, а также нейтрали, заземленной через высокоомный резистор или реактор. На практике же используется, как правило, первый из указанных режимов. Однако при рассмотрении вопросов электробезопасности нельзя обойти вниманием и заземление нейтрали через реактор. Использование такого режима нейтрали может быть направлено на компенсацию емкостной составляющей тока однофазного замыкания. Его применение весьма актуально для наиболее крупных и современных судов, обладающих ЭЭС с повышенными величинами токов однофазных замыканий и прикосновений.

Даже в симметричных ЭЭС может возникнуть напряжение между нейтралью и корпусом судна, которое обусловлено наличием высших гармоник в напряжении. В симметричных электросистемах гармонические составляющие порядка кратного трем имеют одинаковое направление и величину. Их можно рассматривать как три однофазные системы, которые образуют смещение нейтрали на величину геометрической суммы фазных гармонических составляющих

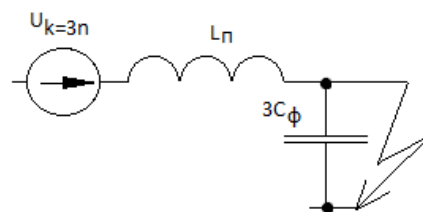
$$U_{см} = 3 \sqrt{\sum_{k=3}^{3n} U_k^2}, \quad (3)$$

где U_k - гармоническая составляющая напряжения; k - номер гармоники.

В ЭЭС с изолированной нейтралью это напряжение формируется между нейтралью и корпусом судна дополнительно к смещению нейтрали, возникшему из-за несимметрии фазных емкостей. В ЭЭС с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор или реактор, это напряжение компенсируется за счет появления тока через устройство заземления нейтрали.

Во-вторых, составляющие, обусловленные высшими гармониками в напряжении, присутствуют в токе однофазного замыкания. Это характерно как для систем с изолированной нейтралью, так и для систем с заземленной нейтралью.

При изолированной нейтрали токи однофазных замыканий, обусловленные гармониками напряжения кратного трем, представляют собой однофазную систему. Ее схема имеет вид (рис. 6).

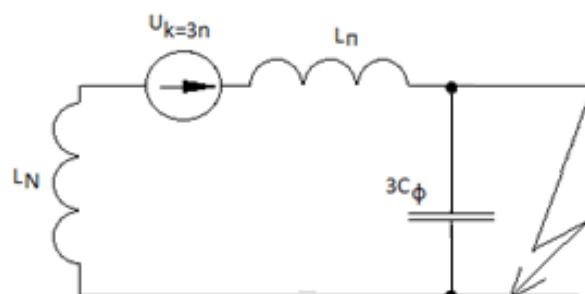


$U_{k=3}$ – гармонические составляющие напряжения кратные трем; L_n – продольная индуктивность электросистемы; C_{ϕ} – емкость каждой фазы электросистемы.

Рис. 6. Схема протекания токов третьей гармоники в ЭЭС с изолированной нейтралью

В такой схеме отсутствует путь для протекания тока. Поэтому гармонический состав тока в месте замыкания или прикосновения обусловлен только гармониками не кратными трем.

При замыкании фазы в системе с заземленной нейтралью через реактор (рис. 7) к высшим гармоникам тока замыкания добавятся гармоники кратные трем. Как видно из приведенной ниже схемы, в этом случае возникает путь для их протекания. Однако сопротивление возникшего контура при заземлении нейтрали через высокоомный резистор или реактор достаточно велико.



L_N – индуктивность устройства заземления нейтрали.

Рис. 7. Схема протекания токов третьей гармоники в ЭЭС с заземленной через реактор нейтралью

Поэтому несмотря на то, что спектр гармонических составляющих в токе через тело человека увеличивается, их величина оказывается весьма небольшой.

Выводы

Проведенный анализ влияния несинусоидальности современной полупроводниковой техники на электробезопасность судовых электроустановок позволил сделать следующие выводы:

1. Ухудшение показателей качества электроэнергии из-за широкого применения силовых полупроводниковых устройств в составе судовых электросистем может привести к некоторому увеличению тока через тело человека при его прикосновении к одной из фаз.

2. Искажение напряжения приводит к протеканию дополнительных токов высших гармоник, которые в электросетях с изолированной нейтралью формируют напряжение смещение нейтрали. Возникшее таким образом напряжение вызывает увеличение опасности токов при возможном последующем однофазном прикосновении.

3. В установившемся токе однофазного прикосновения в сети с изолированной нейтралью могут присутствовать высшие гармоники, обусловленные несинусоидальным напряжением, за исключением гармоник, кратных трем.

4. Заземление нейтрали судовой электросети через реактор либо через высокоомный резистор с

одной стороны способствует снижению напряжения смещения нейтрали, а с другой формирует путь для токов третьей гармоники при возникновении однофазного прикосновения. При этом следует учитывать, что величина третьей гармоники в напряжении сети, как правило, незначительна.

Как показали проведенные исследования на судах, искажение напряжения бортовых электроэнергетических систем находится в пределах, допускаемых нормативными документами. Поэтому вклад высших гармонических составляющих тока однофазного замыкания в рост электробезопасности невелик. Это может объясняться пока недостаточно весомой долей современной полупроводниковой техники в общесудовой нагрузке. Однако тенденция постоянного увеличения объема ее использования в будущем может стать причиной ухудшения электробезопасности судовых электроэнергетических систем.

Литература

1. Благинин В.А., Кажекин И.Е., Юсып В.М. материалы форума «V международный балтийский морской форум» О терминологии в области электробезопасности морской техники. 2017. С. 256-261.
2. Благинин В.А., Кажекин И.Е. Профилактика аварийности отечественного рыболовецкого флота Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3 (111). С. 40-47.
3. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. 2016. Издание утв. 15.09.2015 г.
4. Кажекин И.Е. Определение требований к защите судовых электроэнергетических систем от однофазных замыканий. Электрика. 2011. № 3. С. 35-38.
5. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. EN 50160:2010 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems.
7. ГОСТ 30804.3.2-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.
8. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
9. Данков Е.М. Комплексная оценка опасности поражения электрическим током при эксплуатации рудничных электросистем низкого напряжения. «Вберица», 1973, №9.86 с.

References

1. Blaginin V.A., Kazhekin I.E., YUsyp V.M. materialy foruma «V mezhdunarodnyj baltijskij morskoy forum» O terminologii v oblasti ehlektrobezopasnosti morskoy tekhniki. 2017. Pp. 256-261.
2. Blaginin V.A., Kazhekin I.E. Profilaktika avarijnosti otechestvennogo rybopromyslovogo flota Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2010. № 3 (111). Pp. 40-47.
3. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. 2016. Izdanie utv. 15.09.2015
4. Kazhekin I.E. Opredelenie trebovanij k zashchite sudovyh ehlektroehnergeticheskikh sistem ot odnofaznyh zamykanij. EHlektrika. 2011. № 3. Pp. 35-38.
5. GOST 32144-2013 EHlektricheskaya ehnergiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Normy kachestva ehlektricheskoy ehnergii v sistemah ehlektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.
6. EN 50160:2010 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems.
7. GOST 30804.3.2-2013 Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. EHmissiya garmonicheskikh sostavlyayushchih toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A (v odnoj faze). Normy i metody ispytaniy.
8. GOST 12.1.038-82 Sistema standartov bezopasnosti truda. EHlektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenij prikosnoveniya i tokov.
9. Dankov E.M. Kompleksnaya ocenka opasnosti porazheniya ehlektricheskim tokom pri ehkspluatatsii rudnichnyh ehlektrosistem nizkogo napryazheniya. «Vberica», 1973, №9. 86 p.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 656.073.29

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ
ПРИ СНЯТИИ ОСАДОК МЕТОДОМ ДРАФТ-СЮРВЕЯ****Сергей Владимирович Ермаков**

старший преподаватель кафедры судовождения,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: esv.klgd@mail.ru

Ирина Владимировна Якута

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: yukutas@rambler.ru

Аннотация

В статье проведено исследование и оценка погрешностей, связанных с расхождением массы принятого и сданного груза, которые возникают при их определении по осадкам (методом драфт-сюрвея) и обусловленных различием условий измерений в портах погрузки и выгрузки вследствие наличия волнения при снятии осадок, использования кренометра для определения осадок с одного из бортов, из-за инструментальных погрешностей при определении плотности заборной воды, на течении, а также анализ других возможных погрешностей. Предложены формулы для оценки погрешностей осадки, обусловленных волнением и применением кренометра. При вычислении погрешностей осадки, возникающих из-за проседания судна на течении предложено заменить в традиционных формулах скорость судна на скорость течения. Обосновано два сходных критерия допустимого расхождения в рассчитанных методом драфт-сюрвея массах груза в порту погрузки и в порту выгрузки – строгий и статистический. Эти критерии позволят грузополучателю и перевозчику принимать обоснованное согласованное решение о значимости расхождения масс. Исследования проведены на примере вычисления массы зерна, погруженного на балкер «Oslo Bulk 6» в порту Гавр и выгруженного в порту Рига. В итоге, при анализе строгий критерий расхождение признан допустимым, а в отношении статистического критерия поставлена задача для дальнейшего исследования – обоснование его критического значения.

Ключевые слова: марки углубления, метод драфт-сюрвей, погрешность осадки, погрешность водоизмещения, кренометр, расхождение масс, критерии допустимости

**ERROR ESTIMATION OF WATER DISPLACEMENT WHEN COUNTING
DRAFTS BY THE DRAFT-SURVEY METHOD****Sergey V. Ermakov**

Senior Lecturer at the Department of Navigation,
Baltic Fishing Fleet State Academy,
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: esv.klgd@mail.ru

Irina V. Yakuta

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Navigation Safety,
Baltic Fishing Fleet State Academy,
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: Ykutas@rambler.ru

Abstract

The article presents a study and error estimation associated with mass discrepancy of received and delivered cargo, which arise when they are measured by drafts (draft-survey method) and because of the differences in measurement conditions in the ports of loading and unloading due to the presence of wave disturbance during the draft measurement, using a clinometer to find the draft from one of the boards, due to instrumental errors in determining density of seawater, as well as analyzing other possible errors. Formulas for error estimation of drafts due to heaving and the use of the clinometer

have been proposed. When calculating the draft errors arising due to the ship squat, it has been suggested to replace the ship speed with the current speed in traditional formulas. Two similar criteria have been substantiated, for the allowable mass discrepancy of cargo at the port of loading and at the port of discharge, calculated by the draft-survey method- strict and statistical. These criteria will allow the cargo receiver and the carrier to make an informed and agreed decision on the significance of the mass discrepancy. Studies have been conducted on the example of calculating the mass of grain loaded onto the bulk carrier Oslo Bulk 6 in the port of Le Havre and unloaded in the port of Riga. As a result, when analyzing a rigorous criterion of discrepancy was found to be admissible, and in relation to the statistical criterion, the task was set for further research - substantiation of its critical value.

Key words: draft marks, draft-survey method, draft error, water displacement error, clinometer, mass discrepancy, acceptance criteria

Введение

При погрузке навалочных, насыпных и наливных грузов часто возникает необходимость в определении количества груза на борту судна. Для этого существует и повсеместно используется метод драфт-сюрвея. Этот метод применяется в морской практике перевозки грузов, когда они размещаются на судне без взвешивания. В документах при перевозке таких грузов указывается, что масса груза принята по заявлению отправителя. Чтобы не возникало разногласий, как с отправителем, так и с получателем груза, перевозчик обязан контролировать количество груза по изменениям посадки и водоизмещения судна до и после погрузки (выгрузки) также точно, как это производят профессиональные инспекторы грузоотправителя и грузополучателя.

Расчет принято считать достаточно убедительным в случае, если количество погруженного (выгруженного) груза достигает точности порядка 0,5% от массы всего груза [1]. Таким образом, в качестве критерия допустимого расхождения между массой груза, принятого в порту погрузки, и массой груза, сданного в порту выгрузки, при определении этой массы по осадкам является величина, зависящая только от массы груза. Подобный подход не позволяет дифференцировано подходить к оценке допустимости расхождения к каждому случаю загрузки или выгрузки. Между тем, расхождение в массе груза в конкретно-определённом цикле загрузка-транспортировка-выгрузка сугубо индивидуально и обусловлено неповторимой совокупностью погрешностей различной природы, большинство из которых подлежит количественной оценке. Однако единый подход к допустимости расхождения в массе груза не учитывает конкретных значений этих погрешностей, обуславливающих расхождение, и поэтому не является достаточно объективным и приемлемым, особенно, в пограничных ситуациях. Так, например, наличие даже небольшого волнения увеличивает погрешность при снятии осадок и при дальнейшем расчёте массы груза. Полученная и заниженная вследствие наличия из-за волнения погрешностей в снятии осадок масса груза может инициировать появление расхождения в массах, не удовлетворяющего требованиям практики драфт-сюрвея. При снятии осадок на спокойной воде эти требования бы выполнялись. Парадокс ситуации налицо: расхождение в массах груза будут признано недопустимым вследствие ухудшения гидрометеорологических условий.

В настоящее время в торговом судоходстве имеет место очевидный недостаток эффективного и универсального инструментария для определения

приемлемости расхождения в массах принятого и сданного груза.

1. О необходимости единообразия в оценке допустимого расхождения масс принятого и сданного груза

При использовании метода драфт-сюрвея всегда будет присутствовать разница в рассчитанных величинах принятого и сданного груза. Одинаковые значения свидетельствует больше о фальсификации расчётов и документов, чем об аккуратности лиц, проводящих измерения и вычисления, и точности применяемых ими средств и способов оценки массы груза. Вместе с тем, остаётся не до конца решённой проблема: какую разницу, обусловленную погрешностями метода считать допустимой и когда необходимо принимать меры по выяснению причин превышения этой разницы.

В литературе содержатся разные сведения о количественных оценках суммарной погрешности метода драфт-сюрвея. Так, в [1, 2] указано, что суммарная погрешность может достигать 0,5% от массы груза, в [3] уже указаны немного другие цифры – 0,5-1,0%.

В [4] говорится о том, что опытный специалист, работающий в идеальных условиях, проведет измерения с точностью до 0,1-0,3% на крупногабаритном судне и с точностью до 0,4-0,7% на небольшом судне. Однако идеальные условия для работы практически невозможно обеспечить. Поэтому измерения проводятся с точностью до 0,5% от общей массы груза.

Вместе с тем представленные количественные критерии погрешности определения массы груза по осадкам являются результатом обобщения опыта применения метода, а не теоретического обоснования – любое возникающее расхождение (точнее его допустимость) в итоге разрешается в каждом случае индивидуально согласованным решением представителей судна и грузополучателя. В случае отсутствия согласованного решения, вопрос о расхождении коносаментной (погрузной) и выгрузной массы решается на судне на основе заключений, даваемых экспертами.

Вместе с тем, очевидно, что методические погрешности, возникающие при каждом применении процедуры драфт-сюрвея сугубо индивидуальны, а, значит, и индивидуально допустимое значение расхождения в массах грузов.

Необходимо заметить, что погрешностями нельзя считать ошибки, связанные с нарушением алгоритма расчёта, предусмотренного методом драфт-сюрвея, например, ошибки из-за неучёта различия фактической и табличной плотности воды.

Для дальнейшего анализа принимаем, что погрешности в определении водоизмещения влекут такие погрешности при определении массы груза.

2. Оценка погрешностей водоизмещения при снятии осадок на примере вычисления массы зерна, погруженного на балкер «Oslo Bulk 6»

На практике принято считать, что точность снятия осадок с марок углубления в спокойную погоду при достаточном освещении составляет 1 см [2, 4]. Однако условия для снятия осадок практически редко бывают идеальными, и погрешности могут достигать больших значений. На рис. 1 представлена кривая зависимости погрешности водоизмещения от погрешности осадки, рассчитанная при помощи грузовой шкалы указанного балкера при водоизмещении 5000-10000 т.

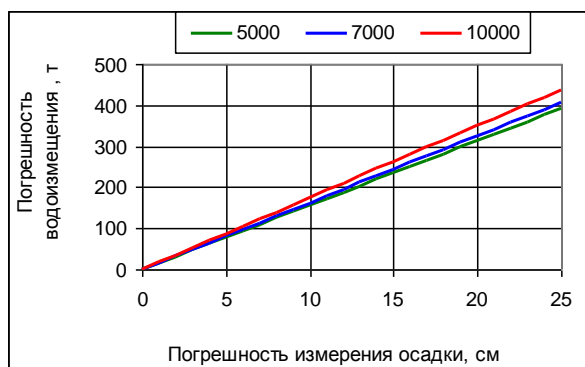


Рис. 1. Зависимость величины погрешности водоизмещения от погрешности снятия и расчёта осадки

Если невозможно снять осадки с обоих бортов, то они снимаются с марок углубления на носу, миделе, корме с одного борта [1]. Осадка T' на каждой марке углубления недоступного борта рассчитывается по формуле

$$T' = T + Btg\Theta / 2 \tag{1}$$

где B – поперечное расстояние между марками углубления правого левого бортов (снимается с чертежа общего вида судна); Θ – угол крена судна, определяемый по кренометру.

В таком случае осадка недоступного борта будет рассчитана со среднеквадратической погрешностью, обусловленной СКП самого прибора:

$$m_{кр,б} = \frac{\partial(Btg\Theta/2)}{\partial\Theta} m_{\Theta} = \frac{B}{2\cos^2\Theta} m_{\Theta} \tag{2}$$

где m_{Θ} – среднеквадратическая погрешность, характеризующая точность кренометра. Тогда и средняя осадка, применяемая для расчётов, будет содержать СКП, равную:

$$m_{кр} = \frac{B}{4\cos^2\Theta} m_{\Theta} \tag{3}$$

Полагая, $m_{\Theta}=0,5^0$, рассчитанная погрешность осадки для различных углов крена балкера «Oslo Bulk 6», представлена на рис. 2.

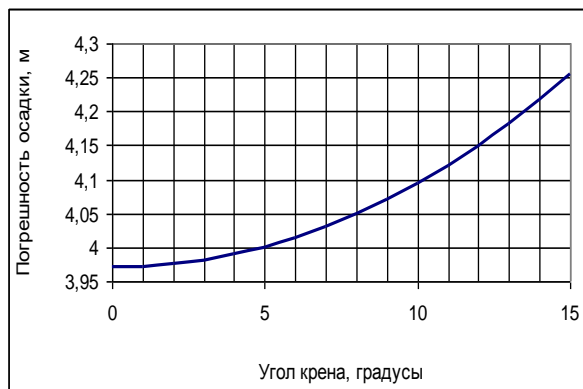


Рис.2. Погрешности в средней осадке при использовании кренометра для снятия осадки с одного борта

Если СКП кренометра равна $0,5^0$, получаем для балкера среднеквадратическую погрешность осадки порядка 4 см, что вызывает погрешности водоизмещения около 65 т (при водоизмещении 7000 т) (рис.3).

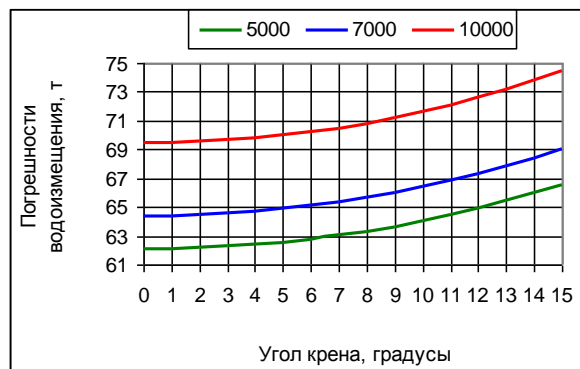


Рис.3. Погрешности в водоизмещении при использовании кренометра для снятия осадки с одного борта

Определение осадок на волнении происходит осреднением амплитуд, при этом со стопроцентной вероятностью можно заключить только то, что фактическая осадка заключена в промежутке от $T_{cp} - h/2$ до $T_{cp} + h/2$, где h – высота волны (высота омывания борта).

Будем считать, что волнение имеет строго гармонический характер. Тогда вероятность того, что некоторая осадка является фактической, будет определяться следующей формулой плотности вероятности случайной величины T :

$$f(T) = \frac{1}{2} \cos\pi \frac{T - T_{cp}}{h} \tag{4}$$

По формуле (4) вероятность того, что фактической осадкой является вычисленная осреднением, равна 0,5. Очевидно, что математическое ожидание случайной величины равно T_{cp} . Для упрощения процедуры определения среднеквадратической погрешности, измеренной на волнении осадки, центрируем случайную величину T , сделав замену $y=T-T_{cp}$. Подобная операция не приведёт к изменению характеристик рассеяния.

Математическое ожидание центрированной величины равно 0, а её дисперсия будет определяться следующим интегралом:

$$D_y = \int_{-h/2}^{+h/2} y^2 \cos \frac{\pi y}{h} dy \quad (5)$$

Для вычисления интеграла (5) воспользуемся таблицей интегралов [5] и получим:

$$D_y = \frac{1}{2} \left[\frac{2yh^2}{\pi^2} \cos \frac{\pi y}{h} \Big|_{-h/2}^{+h/2} + \left(\frac{y^2 h}{\pi} - \frac{2h^3}{\pi^3} \right) \sin \frac{\pi y}{h} \Big|_{-h/2}^{+h/2} \right] =$$

$$= \frac{h^3}{4\pi} - \frac{2h^3}{\pi^3} = \frac{\pi^3 - 8}{4\pi^3} h^3.$$

Таким образом, выражение для СКП осадки, снятой на волнении будет определяться формулой:

$$\tilde{m}_T = \sqrt{D_y} = \sqrt{\frac{\pi^3 - 8}{4\pi^3} h^3} \approx 0,0867 h^{3/2} \quad (7)$$

Формула (7) показывает значительную величину СКП осадки даже на небольшом волнении (рис.4).

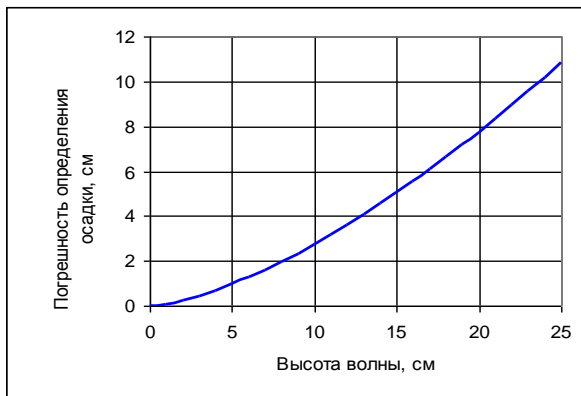


Рис 4. Погрешность определения осадок на волнении

Если осадки судна снимаются, когда судно находится на течении, в расчёте водоизмещения появляется ещё одна составляющая погрешности, обусловленная скоростным проседанием судов. Для оценки величины проседания воспользуемся формулой [6]:

$$\delta T_{прос} = \frac{(K^2 - 1) \cdot v_m^2}{2g} \quad (8)$$

где K – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения L/B, v_m – скорость течения, g – ускорение свободного падения.

Так, для нашего балкера (L/B=5,71, $K \approx 1,26$) погрешность в определении осадки на течении скоростью 5 уз составит почти 20 см, что повлечет погрешность водоизмещения около 300 т (рис.5,6).



Рис.5. Проседание судна на течении

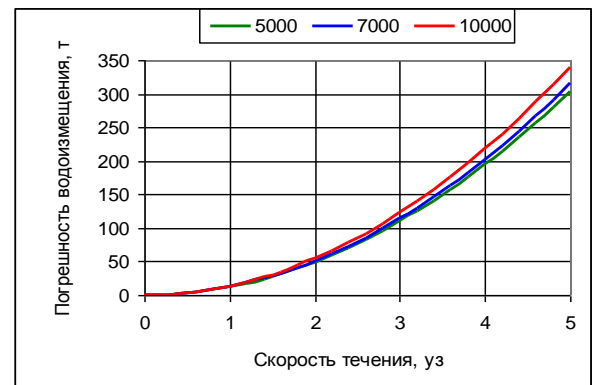


Рис. 6. Погрешность определения водоизмещения вследствие неучёта проседания судна на течении

Как правило, грузовые шкалы судов рассчитываются для какой-то фиксированной плотности забортной воды, которая в общем случае отлична от фактической. В таком случае необходимо исправить поправкой $\delta \Delta_\rho$ на плотность забортной воды [1, 2]:

$$\delta \Delta_\rho = \frac{\Delta' \cdot (\rho_{факт} - \rho_{табл})}{\rho_{табл}} \quad (9)$$

где Δ' – водоизмещение судна, исправленное поправками на дифферент, крен и прогиб; $\rho_{факт}$ – плотность забортной воды; $\rho_{табл}$ – плотность воды, для которой составлена грузовая шкала или гидростатические кривые.

Чтобы вычислить поправку (9) необходимо предварительно измерить плотность забортной воды сразу по окончании снятия осадок, поскольку она может измениться с приливом, а также с изменением температуры воды.

Вследствие наличия у ареометра инструментальной погрешности возникает погрешность и в определении поправки водоизмещения на плотность забортной воды и в самом водоизмещении. Величину этой погрешности, исходя из выражения (9), можно оценить формулой:

$$m_{\Delta, \rho} = \frac{\Delta \cdot m_{ареом}}{\rho_{табл}} \quad (10)$$

Принимая $\rho_{\text{табл}}=1,024 \text{ т/м}^3$ и $m_{\text{ареом}}=0,005 \text{ т/см}^3$, получим для балкера с водоизмещением 7000 т погрешность водоизмещения, равную около 35 т (рис.7).



Рис.7. Погрешность водоизмещения, вызванная погрешностью ареометра

При недостаточно качественных приборах, используемых для снятия замеров, точность измерений будет колебаться в пределах 1%. Ошибки техники могут остаться незамеченными даже для специалиста, а тем более для его работодателя, не имеющего представления о принципе работы данного метода. Даже при использовании самой лучшей техники неблагоприятные погодные условия и отсутствие помощи экипажа может повлиять на точность измерений до 0,5% [4].

Источником погрешностей в определении водоизмещения и массы груза также может быть масштаб грузовой шкалы и кривой водоизмещения, используемых для расчета. Величины этих погрешностей составляют около 20 т. Погрешность в определении веса судовых переменных запасов достигает до 30-40 т [3].

Предлагаемый критерий допустимого расхождения значений массы груза при погрузке и выгрузке основан на вычислении полных средних квадратических погрешностей определения водоизмещения судна перед загрузкой m_{11} , после загрузки m_{12} , перед выгрузкой m_{21} и после выгрузки m_{22} . Полная СКП разности значений массы груза в порту загрузки и в порту выгрузки будет определяться формулой:

$$m_{\Delta W} = \sqrt{m_{11}^2 + m_{12}^2 + m_{21}^2 + m_{22}^2} \quad (11)$$

Условием допустимости расхождения будет неравенство:

$$\Delta W \leq m_{\Delta W} \quad (12)$$

где $\Delta W=W_2 - W_1$ – разность между массой груза, рассчитанной при погрузке, и массой груза, рассчитанной при выгрузке.

Разность между массой груза, рассчитанной при погрузке, и массой груза, рассчитанной при выгрузке, можно считать допустимой, если она

меньше общей среднеквадратической погрешности (11).

Расчёт погрешностей, входящих в выражение (11) предлагается представлять в виде таблицы погрешности расчётов масс груза с указанием каждой составляющей погрешности. Для составления таблицы погрешностей расчёта масс груза необходимо всеми существующими методами (в том числе и предложенными) оценить погрешности в определении водоизмещения.

Предлагаемая методика, основанная на сравнении фактического расхождения с погрешностью, позволяет сформулировать более эффективный, гибкий и универсальный критерий.

После нормирования расхождения с использованием функции Лапласа $\Phi(x)$ получаем:

$$P_{\Delta W=0} = 1 - \Phi\left(\frac{\Delta W}{m_{\Delta W}}\right) \quad (13)$$

Критерий (13) является статистическим и показывает вероятность того, что $\Delta W=0$.

Для обоснования критических значений критерия (13) необходимо провести более глубокое исследование процедуры драфт-сюрвея. Вместе с тем если в (13) приравнять аргумент функции Лапласа единице, как следует из неравенства (12), то можно, используя таблицу значений функции Лапласа [7], получить критическое значение критерия (13), исходя из условия допустимости (12):

$$P_{\Delta W} = 1 - \Phi(1) = 0,683 = 68,3\%$$

В рассматриваемом примере с балкером «Oslo Bulk 6» вероятность составляет:

$$P_{\Delta W} = 1 - \Phi\left(\frac{25,08}{83,5}\right) = 0,764 = 76,4\% > 68,3\%.$$

Заключение

Предложенная в статье методика оценки расхождения массы принятого груза и массы сданного груза, полученные методом драфт-сюрвея, включая строгий и статистический критерии, формулы для оценки погрешностей определения осадки судна при помощи кренометра на волнении и на течении, погрешности определения водоизмещения, вызванной инструментальной погрешностью ареометра, позволит всем заинтересованным лицам принимать согласованное решение о значимости расхождения груза. При этом методика позволяет учесть условия измерений и в итоге избежать необоснованных и парадоксальных выводов.

После доработки в части, касающейся определения граничных значений критерия (13), и нормативно-правовой кодификации, методика может стать неотъемлемой и обязательной составляющей метода драфт-сюрвея, предназначенной для контроля массы груза в процессе его перевозки морем.

Литература

1. Письменный М.Н. Определение количества груза по осадкам судна. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2006. 45 с.
2. Филимонов В.Н. Расчёт массы груза по осадкам судна. Калининград: Калинингр. гор. тип., 2005. 64 с.
3. Головкин Е.М. Грузовая марка судна. URL: http://www.seaworm.narod.ru/14/golovkin_gruzovaia_marka.doc.

4. Методика определения веса груза на борту судна методом драфт-сюрвея. URL: <http://www.trfc.ru/str2.html> (дата обращения: 16.11.2018).
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправленное. М.: Наука, 1986. 544 с.
6. Ганессен В.В. Плавание судна на мелководье и в узкости. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. 63 с.
7. Мореходные таблицы 2000 г. (MT-2000). С-Пб.: ГУНиО МО РФ, 2002. 577 с.

References

1. Pis'mennyj M.N. Opredelenie kolichestva gruzu po osadkam sudna [Determination of the amount of cargo on vessel's draft]. Vladivostok: MGU im. adm. G.I. Nevel'skogo, 2006. 45 p.
2. Filimonov V.N. Raschjot massy gruzu po osadkam sudna [Calculation of the mass of the cargo on the vessel's draft]. Kaliningrad: Kaliningr. gor. tip., 2005. 64 p.
3. Golovkin E.M. Gruzovaja marka sudna [Plimsoll mark of vessel]. URL: http://www.seaworm.narod.ru/14/golovkin_gruzovaia_marka.doc.
4. Metodika opredelenija vesa gruzu na bortu sudna metodom draft-sjurveja [Methods of determining the weight of the cargo on board the ship by draft survey]. URL: <http://www.trfc.ru/str2.html> (date of the application: 16.11.2018).
5. Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. 13-e izd., ispravlennoe. M.: Nauka, 1986. 544 p.
6. Ganessen V.V. Plavanie sudna na melkovod'e i v uzkosti [Sailing vessel in shallow water and in the narrows]. Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2006. 63 p.
7. Morehodnye tablicy 2000 g. (MT-2000) [Seafaring tables 2000]. S-Pb.: GUNiO MO RF, 2002. 577 p.

УДК 004.93'1

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ ПОТОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРОТОТИПА САМООБУЧАЮЩЕГОСЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Руслан Константинович Поляков

кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научно-исследовательской деятельности
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, д. 1.
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

Николай Алексеевич Долгий

заведующий лабораториями кафедры автоматизации производственных процессов
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: dolgi@klgtu.ru

Аннотация

В работе изложены результаты исследований автора, предметом которых является система технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства. Автором показаны существующие перспективные алгоритмы и дана их сравнительная оценка. Приведена общая схема работы алгоритма отбраковки некачественной упаковки. Обобщенная характеристика современных алгоритмов машинного обучения, показала, что анализ и классификация изображений является ключевым процессом в задаче по управлению диагностикой герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства. При этом точность создаваемой программы зависит от ряда факторов, таких как размер объекта, мета-архитектура и блока извлечения признаков. Особое же внимание при разработке таких программ следует уделять нахождению компромисса между тенденцией повышения скорости работы приложения, потребляемыми вычислительными ресурсами и сохранением качества точности. В статье представлен первый этап научно-исследовательской работы, который посвящен разработке методики диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства для прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения.

Ключевые слова: инновации; система технического зрения, методы, искусственные нейронные сети, машинное обучение, контроль качества.

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

Ruslan K. Polyakov

PhD in Economics, Associate Professor, Director for Research
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Konstantin G. Kuzminov

Leading expert in the field of machine learning and computer vision LLC INTRLIK
Kaliningrad state technical university
Sovetskiy Prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: zal1357@gmail.com

Nikolaj A. Dolgij

head of laboratories of the department of automation of production processes
Kaliningrad state technical university
Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: dolgi@klgtu.ru

Abstract

The paper presents results of the author's research results, the subject of which is a machine vision system for diagnosing food packaging tightness in conditions of mass production. The author has showed the existing promising algorithms and given their comparative evaluation. A general scheme of the algorithm for rejecting poor-quality packaging is given. A generalized description of modern machine learning algorithms has shown that analysis and classification of images is a key process in the task of managing the diagnosis of food packaging tightness in conditions of flow-line production. At the same time, the accuracy of the programme being created depends on a number of factors, such as the size of the object, the meta-architecture and the feature extraction block. Particular attention in the development of such programmes should be given to finding a compromise between the tendencies to increase the speed of the application, consumed by computing resources and preserving accuracy quality. The article presents the first stage of the research work, which is devoted to the development of methods for diagnosing food packaging tightness under flow-line production for a prototype of a self-learning software-hardware complex of machine vision.

Key words: innovations; artificial vision system, methods, artificial neural networks, machine learning, quality control.

Введение

В настоящее время, вопросам автоматизации поточных консервных линий, на предприятиях пищевой промышленности, уделяется существенное внимание. Однако на большинстве поточных линий до сих пор не находят применения современные системы технического зрения, которое смогли бы восполнить пробел в осуществлении непрерывного автоматического контроля герметичности готовых консервов.

В тоже время на предприятиях пищевой промышленности, в частности в рыбоперерабатывающей и мясоперерабатывающей отрасли нет разработанных и апробированных методических подходов по внедрению и использованию таких комплексов технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства.

Анализ пищевой и перерабатывающей отрасли показал, что доля отечественного пищевого оборудования на внутреннем рынке составляет порядка 20%, при этом объём рынка оборудования для пищевой и перерабатывающей промышленности за 2017 год вырос на 2% до 59,7 млрд рублей, а импорт составит 48,4 млрд рублей.

Как видно, потребность в таких методических разработках, весьма высока и востребована руководителями предприятий пищевой промышленности Российской Федерации.

В этой связи основой разрабатываемой методики системы контроля качества является реальная потребность предприятий в современных комплексах диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства.

При этом особое внимание при модернизации поточных консервных линий должно быть уделено созданию и внедрению систем непрерывного автоматизированного контроля герметичности упаковки пищевых продуктов, в условиях поточного

производства, что является основной задачей рассматриваемой работы.

Для решения этой задачи следует применить, как одно из перспективных направлений применения новых технических средств, использование микропроцессорной техники и средств технического зрения.

1. Современные алгоритмы задач детектирования

С развитием свёрточных нейронных сетей и глубокого обучения метод сканирующего окна, алгоритмы Виолы-Джонса и дальнейший анализ при помощи SVM несколько устарели. Появились сети, которые на своём выходе дают не только класс объекта, но и ограничивающий объект прямоугольник: x, y, w, h . Это хотя и требует несколько более быстрого аппаратного обеспечения, обеспечивает на выходе более качественный результат.

Нейросети для задач детектирования развились относительно недавно - с 2016 года. Одной из главных тенденций 2016 года в области обнаружения объектов стал переход к более быстрым и эффективным системам обнаружения. В таких подходах, как YOLO, SSD и R-FCN сделан шаг к совместным вычислениям на всём изображении целиком. Этим они отличаются от ресурсоёмких подсетей, связанных с техниками Fast/Faster R-CNN. Такую методику обычно называют «тренировкой/обучением от начала до конца» (end-to-end training/learning).

По сути, идея состоит в том, чтобы избежать применения отдельных алгоритмов для каждой из подпроблем в изоляции друг от друга, поскольку обычно это повышает время обучения и снижает точность нейросети. Говорится, что такая адаптация нейросетей для работы от начала до конца обычно происходит после работы первоначальных подсетей и, таким образом, представляет собой ретроспективную оптимизацию [1]. Однако техники Fast/Faster R-CNN остаются высокоэффективными и

по-прежнему широко используются для обнаружения объектов, кроме того среди разработок последнего времени по быстродействию выделяются SSD и YOLO.

Одной из главных тенденций 2016 года в области обнаружения объектов стал переход к более быстрым и эффективным системам обнаружения. Это видно по таким подходам как Faster R-CNN [2], R-FCN [3], Multibox [4], SSD [5] и YOLO [6] в качестве шага к совместным вычислениям на всём изображении целиком. Этим они отличаются от ресурсоёмких подсетей, связанных с техниками Fast/Faster R-CNN. Такую методику обычно называют «тренировкой/обучением от начала до конца» (end-to-end training/learning).

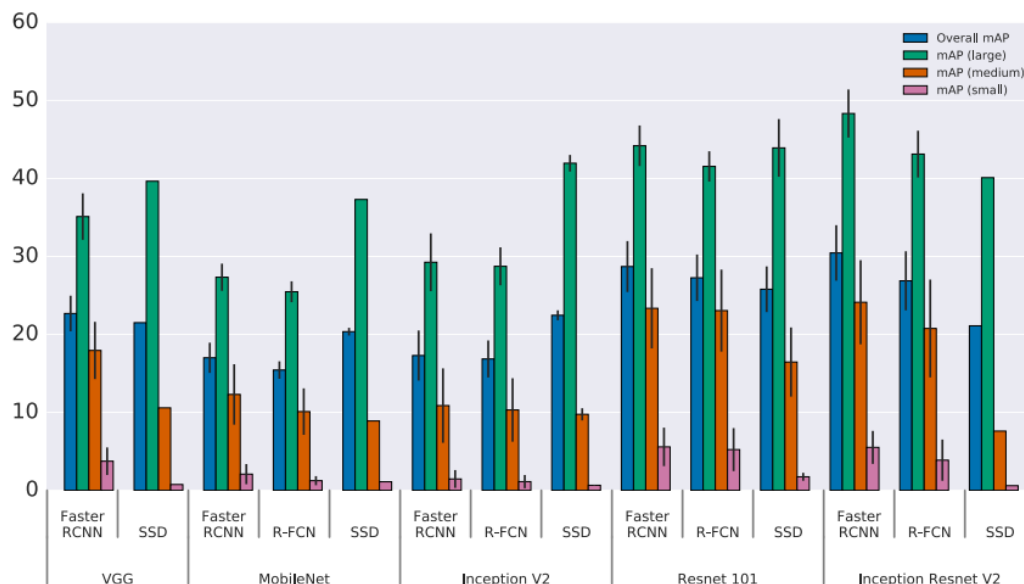
Компромисс между точностью и размером объектов при обнаружении объектов на разных архитектурах представлен на Рис. 1.

На рисунке 1 по вертикальной оси отложен показатель mAP (mean Average Precision), а по горизонтальной оси — разнообразие мета-

архитектур для каждого блока извлечения признаков (VGG, MobileNet Inception ResNet V2), в свою очередь mAP отражает среднюю точность для малых, средних и крупных объектов. Как видно из диаграммы точность зависит от ряда факторов таких как размера объекта, мета-архитектура и блока извлечения признаков. Для указанного рисунка размер изображения зафиксирован на 300 пикселях.

Из выше указанного исследования видно, что модель Faster R-CNN выделяется из числа других, однако важно отметить, что эта мета-архитектура значительно медленнее, чем более современные подходы, такие как R-FCN. Более подробное сравнение производительности R-FCN, SSD и Faster R-CNN указана в статье Huang et al. [6].

Необходимо отметить, что из-за сложностей точного сравнения техник машинного обучения авторы статьи [6] рассматривают эти архитектуры как «мета-архитектуры» и предлагают их сочетать с разными блоками извлечения признаков и разрешениях, такими как ResNet или Inception.



Источник: Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors Proceedings [6]
 Рис. 1. Компромисс между точностью и размером объектов при обнаружении объектов на разных архитектурах

Данные сравнения показателей точности алгоритмов YOLO и FASTER R-CNN приведены в таблице 1. Результаты были получены на обучающих выборках VOC 2007 и VOC 2012.

Таблица 1
 Сравнение представленных алгоритмов

Метод	Средняя точность	FPS (Кадров в секунду)
Fast R-CNN	69.7	0.6
Faster R-CNN VGG-16	72.9	7
YOLO	63.7	44
YOLOv2	76.9	68

Источник: Составлено автором статьи

Из данных табл. 1 можно сделать следующие выводы. Первая версия YOLO работает

значительно быстрее Fast и Faster R-CNN, что связано с использованием в R-CNN подхода RPN, который требует значительных вычислений, однако, немного уступает в точности. Ошибка в YOLO одновременно включает ошибки локализации и ошибки классификации, в отличие от R-CNN, где они учитываются независимо друг от друга, так как составные сети обучаются независимо. На эти особенности было уделено особое внимание при построении функции ошибки при разработке YOLO v2 и YOLOv3 [7]. Нейронные сети были разработаны с использованием стека Keras/tensorflow, либо tensorflow.

Итак, преимущества подхода YOLO: для нахождения объектов на изображении и их классификации необходима одна нейронная сеть, в отличие от сетей подобных R-CNN. Также данный алгоритм довольно успешно может использоваться в системах реального времени, однако для этого

необходимы соответствующие вычислительные мощности. Наибольшая производительность достигается при использовании GPU.

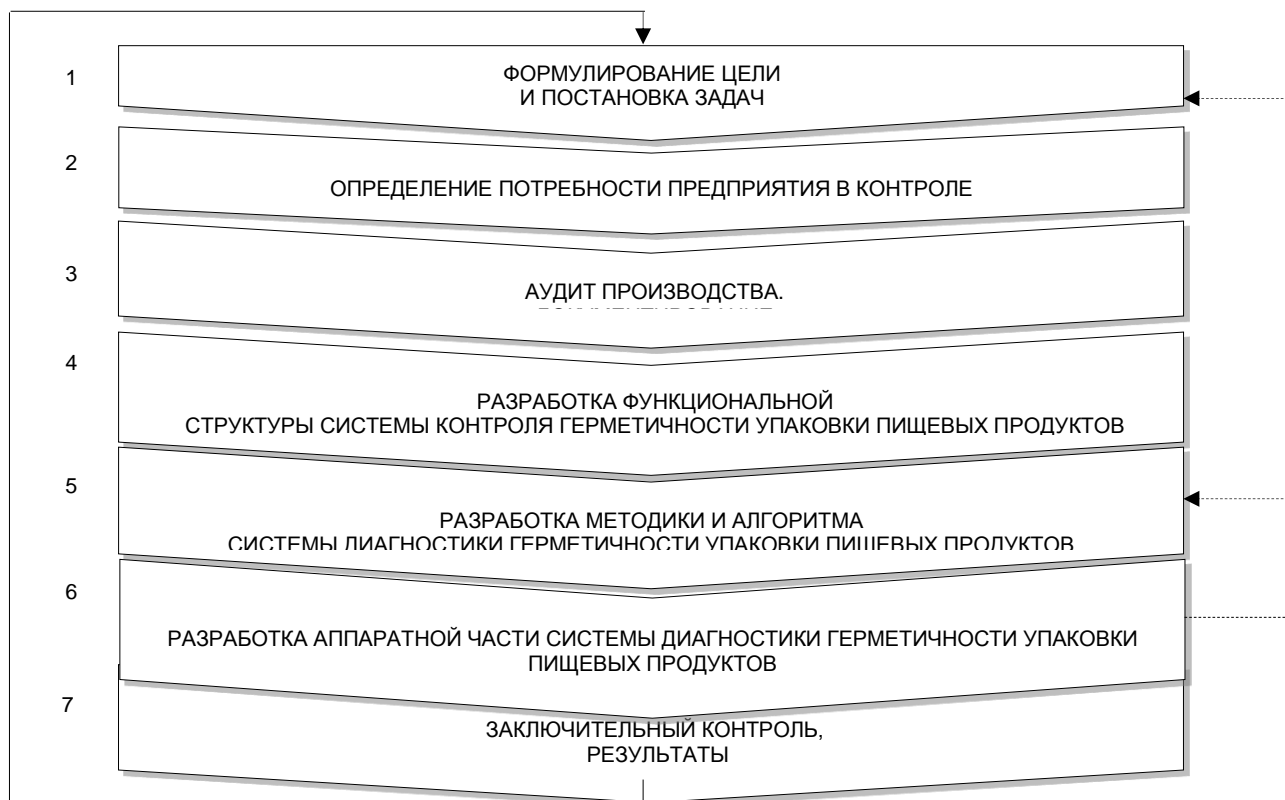
В научных статьях [8, 9] так же подчёркивается, что необходимо находить компромисс между тенденцией повышения скорости работы приложения, потребляемыми вычислительными ресурсами и сохранением качества точности. Авторы отчёта так же придерживаются данного мнения и разрабатывают собственный алгоритм с учётом выше приведённых особенностей.

2. Разработка системы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства

Иллюстрация основных этапов создания подсистемы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в технологическом процессе, в условиях поточного производства представлена на рисунке 2.

ПЕРВЫЙ ЭТАП. Формируется цель «Внедрить самообучающийся программно-аппаратный комплекс технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства» и ставятся задачи по выявлению возможностей у предприятия. При этом руководством предприятия принимается решение и происходит постановка задачи в рамках совершенствования системы управления технологическом процессом.

ВТОРОЙ ЭТАП. На данном этапе проводится изучение экономической и производственной информации, полученной непосредственно от руководства предприятия, о величине потерь в результате брака, себестоимости выпускаемой продукции, производственных возможностях, технических параметров производства и т.п. Далее производится оценка потребности предприятия в контроле герметичности упаковок.



Источник: Составлено автором статьи

Рис. 2. Этапы к созданию подсистемы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в технологическом процессе, в условиях поточного производства пищевого предприятия

ТРЕТИЙ ЭТАП. Выезд на предприятие, осмотр производственной линии. Аудит производства. Документирование. Получение всей необходимой информации о технологическом процессе в тесном взаимодействии с представителями предприятия с целью внедрения в технологический процесс самообучающийся программно-аппаратный комплекс технического зрения, исходя из реальных потребностей и возможностей предприятия.

ЧЕТВЁРТЫЙ ЭТАП. Цель данного этапа провести экспертизу производственного процесса, выявить наиболее проблемные участки в

производственной линии на наличие потенциальной возможности создания брака и задокументировать их. Далее используя полученную информацию методом синтеза и анализа технологических систем спроектировать операторную модель и разработать функциональную структуру системы контроля герметичности упаковки пищевых продуктов.

ПЯТЫЙ ЭТАП. Разработка методики и алгоритма системы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов. На данном этапе происходит получение цифровых изображений от одной или

нескольких светочувствительных камер и её преобразование в управляющее воздействия на технологический объект и средства отображения информации.

Ниже на рисунке 3 представлены основные этапы с функциями системы компьютерного зрения, которые могут быть использованы при проектировании прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства при использовании классической схемы компьютерного зрения. В нейросетевом подходе детектирование, сегментация и высокоуровневая обработка объединены в один этап.

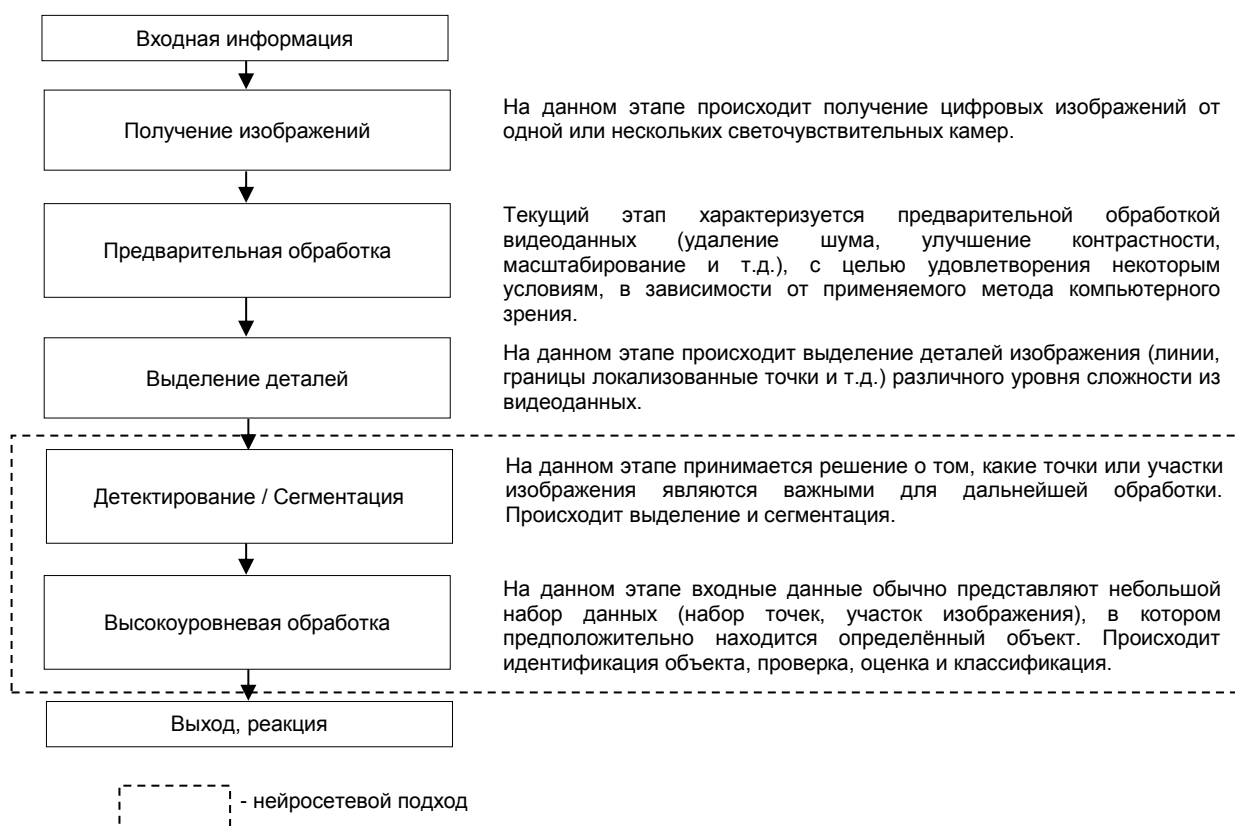
Сама задача может быть представлена как классическая задача двухклассовой классификации и, следовательно, может быть решена с

использованием алгоритмов машинного обучения. Так как заранее можно подобрать образцы герметичных и негерметичных банок, это определяет выбор алгоритмов обучающихся по принципу «стимул–реакция» (supervised learning).

Задачи анализа и классификации можно представить в виде конвейера:

1. Идентификация исследуемого объекта на изображении.
2. Отделение исследуемого объекта от изображения.
3. Преобразование исследуемого объекта в набор его характеристик.
4. Классификация характеристик исследуемого объекта.

На вход этого конвейера подаются изображения с камер подсистемы технического зрения, выходом будет логическое значение true/false.



Источник: Составлено авторами статьи

Рис. 3. Этапы системы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства

В конкретной задаче анализа и классификации изображений жестяных банок по признаку герметичности в условиях поточного производства на вход конвейера так же подаётся угол положения камеры в момент снимка. Эта информация используется при отделении исследуемого объекта от изображения.

Общая схема работа алгоритма отбраковки некачественной упаковки (на этапе детектирования):

1. Обработка видеоизображения, разбиение изображения на отдельные кадры для подачи в алгоритм детектирования.

2. Далее возможны два варианта работы с изображением, вариант А и Б:

Вариант А: классический алгоритм машинного зрения:

- a) Поиск объекта (банки) на общем фоне с помощью предобученных каскадов Хаара.
- b) Выделение объекта (банки) из фона на основании предварительного собранного и обработанного комплекта изображений.
- c) Проход по объекту и его классификация по наличию/отсутствию повреждений при помощи алгоритма классификации.

- d) Выдача на дальнейшую обработку координат поврежденного объекта.

Вариант В: нейросетевой подход:

a) Единственный проход предобученной сверточной сети по изображению и поиск любых видов упаковки, поврежденных либо нет.

b) Выдача на дальнейшую обработку координат поврежденного объекта.

3. Дальнейшая работа алгоритма не зависит от выбранного метода детектирования, но также может работать в двух вариантах:

Вариант А: имеется оператор:

a) Отрисовка координат объекта вместе с объектом на изображении, выдача изображений как видеопоток для визуального контроля.

b) Подача аудиовизуального сигнала оператору при появлении поврежденного объекта.

Вариант В: автоматическая отбраковка:

a) Отрисовка координат объекта вместе с объектом на изображении, выдача изображений как видеопоток для визуального контроля.

b) Сравнение полученных координат поврежденного объекта с ранее заложенными.

c) При пересечении объектом определенного мета на конвейере - подача сигнала откидывающему механизму.

Реализация самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства сильно зависит от аппаратной платформы и требований по производительности. На данном этапе необходимо оттестировать и принять решение по использованию наиболее эффективного варианта архитектуры.

ШЕСТОЙ ЭТАП. Разработка аппаратной части системы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов. На основе требований к функционалу, функциональной схемы и выбранного алгоритма производится подбор аппаратной части удовлетворяющий техническому заданию (Заявка № С1-41610, 1-й этап проекта 41354).

Если же в результате разработки прототипа самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения для диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства будут выявленные отклонения в методике и алгоритме системы диагностики герметичности упаковки пищевых продуктов следует вернуться на шаг выше, к этапу 5. В противном случае, если цели и задачи проекта не были удовлетворены, необходимо перейти к этапу 1.

СЕДЬМОЙ ЭТАП. Заключительный контроль, результаты. Изготовленный и стабильно работающий самообучающийся программно-аппаратный комплекс технического зрения производит непрерывную диагностику герметичности упаковки пищевых продуктов в условиях поточного производства, делает заключение о герметичности упаковки, направляет дефектную продукцию в специальный накопитель, определяет производительность упаковочной линии

и процент дефектов, оповещает персонала в случае обнаружения дефектной банки путём сигнализации (цвет и звук). В будущем необходимо предусмотреть возможность расширения функционала системы и заложить возможность уточнять параметры настройки упаковочной машины и др.

В дальнейшем все обработанные данные могут быть исследованы и проанализированы, с целью выявления свойств темпоральности, для задач планирования, управления и принятия решений в рыбохозяйственной отрасли [10].

На завершающем этапе создания самообучающегося программно-аппаратного комплекса технического зрения осуществляется заключительный контроль и мониторинг результатов диагностики. Подводятся итоги работы программно-аппаратного комплекса технического зрения. Затем производится возврат на 1-й этап, с целью рассмотрения другого места генерирующего брак в технологическом процессе производства.

Заключение

Современные предприятия пищевой и перерабатывающей отрасли неразрывно связаны с поточными линиями производства и упаковки пищевых продуктов. Широкое применение автоматических линий и автоматизированных производственных систем неразрывно связаны с управляющими ЭВМ. При этом эффективность поточных линий существенно зависит от степени автоматизации технологических операций на производстве. Обеспечение рациональной структуры производства в рамках технологического процесса имеет в настоящее время первостепенное значение.

В настоящее время, вопросам автоматизации поточных консервных линий, на предприятиях пищевой промышленности, уделяется существенное внимание. Однако подавляющая часть современных поточных линий до сих пор не используют автоматический контроль герметичности готовой продукции. Между тем в большинстве случаев итоговый контроль осуществляется выборочно, либо ручным способом на основе визуального осмотра [11].

Сегодня под герметичностью понимают способность оболочки (корпуса), отдельных её элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между средами, разделёнными этой оболочкой [12].

Согласно ГОСТ 26790-85 «герметичность» – свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных и (или) жидких веществ [13].

Как видно из выше приведённых определений «герметичность» это обязательный показатель качества консервированной продукции и важное свойство, которое, безусловно, должно быть учтено при производстве и инжиниринге герметизируемых объектов.

В связи с этим основное внимание при модернизации поточных упаковочных линий должно быть уделено созданию и внедрению самообучающейся систем непрерывного автоматизированного контроля герметичности готовой продукции, что является основной задачей современных промышленных предприятий.

Литература

1. Ng Andrew Y. On Optimization Methods for Deep Learning // n Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning / Stanford University. 2011. P. 8.
2. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. In Advances in neural information processing systems, pp. 91–99, 2015.
3. J. Dai, Y. Li, K. He, and J. Sun. R-FCN: Object detection via region-based fully convolutional networks. arXiv preprint arXiv:1605.06409, 2016.
4. Szegedy C., Reed S., Erhan D., Anguelov D.. Scalable, high-quality object detection. arXiv preprint arXiv:1412.1441, 2014.
5. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S.. SSD: Single shot multibox detector. arXiv preprint arXiv:1512.02325, 2015.
6. Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Y., Guadarrama S., Murphy K. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017 2017-January, c. 3296-3305
7. Joseph Redmon. YOLO: Real-Time Object Detection. University of Washington CSE. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>
8. Wu B., landola F., Jin P.H., Keutzer K. SqueezeDet: Unified, Small, Low Power Fully Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection for Autonomous Driving. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2017-July,8014794, pp. 446-454
9. Hong S., Roh B., Kim K., Cheon Y., Park M. PVANet: Lightweight Deep Neural Networks for Real-time Object Detection. arXiv:1611.08588v2 [cs.CV] 9 Dec 2016
10. Тристанов А.Б., Луковенкова О.О., Поляков Р.К. Модель временного ряда для задач анализа темпоральных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 2. № 4 (34). С. 46-50.
11. Долгий Н.А. Операторная модель поточной линии производства консервов из обжаренной рыбы / Н.А. Долгий // Известия КГТУ. Научный журнал, Калининград, Изд. ФГБОУ ВПО «КГТУ», №27, 2012г. С. 69-73.
12. Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1969-1978.
13. ГОСТ 26790-85 Техника течеискания. Термины и определения.

References

1. Ng Andrew Y. On Optimization Methods for Deep Learning Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning. Stanford University. 2011. P. 8.
2. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. In Advances in neural information processing systems, pp. 91–99, 2015.
3. J. Dai, Y. Li, K. He, and J. Sun. R-FCN: Object detection via region-based fully convolutional networks. arXiv preprint arXiv:1605.06409, 2016.
4. Szegedy C., Reed S., Erhan D., Anguelov D.. Scalable, high-quality object detection. arXiv preprint arXiv:1412.1441, 2014.
5. Liu W., Anguelov D., Erhan D., Szegedy C., Reed S.. SSD: Single shot multibox detector. arXiv preprint arXiv:1512.02325, 2015.
6. Huang J., Rathod V., Sun C., Zhu M., Korattikara A., Fathi A., Fischer I., Wojna Z., Song Y., Guadarrama S., Murphy K. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors. Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017 2017-January, pp. 3296-3305.
7. Joseph Redmon. YOLO: Real-Time Object Detection. University of Washington CSE. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>
8. Wu B., landola F., Jin P.H., Keutzer K. SqueezeDet: Unified, Small, Low Power Fully Convolutional Neural Networks for Real-Time Object Detection for Autonomous Driving. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2017-July,8014794, pp. 446-454.
9. Hong S., Roh B., Kim K., Cheon Y., Park M. PVANet: Lightweight Deep Neural Networks for Real-time Object Detection. arXiv:1611.08588v2 [cs.CV] 9 Dec 2016.
10. Tristanov A B Lukovenkova O O Polyakov R K MODEL VREMENNOGO RYADA DLYA ZADACH ANALIZA TEMPORALNYH OBEKTOV. Morskie intellektualnye tekhnologii 2016 T.2 №4(34), pp. 46-50.
11. Dolgin NA, Long NA (2012) Operator model of the production line for canned food from fried fish. Izvestia KSTU. Scientific journal, Kaliningrad, FGBOU HPE "KSTU", No. 27: 69-73.
12. The Great Soviet Encyclopedia. - Moscow: Soviet Encyclopedia, (1969 – 1978).
13. GOST 26790-85 (1985) Technique of leakage. Terms and Definitions.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 658.262; 658.512:005

**РЕЖИМНОЕ НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ РЕГИОНАЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА****Виктор Иванович Гнатюк**

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 Владимирович Луценко

кандидат технических наук, доцент,
научный сотрудник технопарка,
Калининградского государственного технического университета
236022, Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: lutsenko@bk.ru

Дмитрий Геннадьевич Морозов

аспирант
генеральный директор ООО «Гермес»
236048, Калининград, ул Бровковича, 2а
e-mail: morozov@dmitry.by

Аннотация

Известно, что анклавное положение Калининградской области из-за обострения внешнеполитических противоречий может привести к изолированной работе регионального электротехнического комплекса, что выдвигает на первый план вопрос бесперебойного функционирования всех подсистем. Внезапные перебои или отключение электроснабжения вследствие взаимовлияния энергосистемы на другие сферы жизнедеятельности от простых точек розничной торговли до больниц и объектов, обеспечивающих безопасность региона, могут привести к чрезвычайным ситуациям техногенного характера. Таким образом, для недопущения возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера при эксплуатации систем электроснабжения объектов регионального электротехнического комплекса необходима разработка научно обоснованных методов и методик управления электропотреблением в различных режимах функционирования. Для обеспечения непрерывного функционирования системы электроснабжения объекта регионального электротехнического комплекса в целом, на всех её уровнях, необходимо реализовать процедуру режимного нормирования электропотребления. Для сбора точной и своевременной информации предлагается использовать разработанное под руководством профессора В.И. Гнатюка устройство для режимного ограничения электропотребления объектов и базу данных.

Ключевые слова: режимное нормирование, чрезвычайные ситуации, управление электропотреблением, региональный электротехнический комплекс, уровни электроснабжения, электроэнергия, безопасность электроснабжения, база данных.

**SECURITY ELECTRICITY RATIONING DURING THE OPERATION OF THE
OBJECTS OF THE REGIONAL ELECTROTECHNICAL COMPLEX****Viktor I. Gnatyuk**

DSc in Engineering, Professor at the Department of Electrical Equipment of Ships and Power Engineering,
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg R. Kivchun

PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Telecommunications of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies,
I.Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Dmitriy V. Lutsenko

PhD in Engineering, Associate Professor,
Researcher at the Technopark
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: lutsenko@bk.ru

Dmitriy G. Morozov

Postgraduate Student
Director General "Germes" LLL
236048, Kaliningrad, ul.Brovkovicha, 2a
e-mail: morozov@dmitry.by

Abstract

It is well-known that the enclave position of the Kaliningrad region due to the aggravation of foreign policy contradictions can lead to isolated work of the regional electrical engineering complex, which highlights the issue of the smooth functioning of all subsystems. Sudden black-outs or power outages due to the mutual influence of the energy system on other areas of life, from simple retail outlets to hospitals and facilities that ensure security of the region, can lead to man-made emergencies. Thus, in order to prevent the occurrence of emergency situations of a technogenic nature in the operation of power supply systems of the objects of the regional electrical engineering complex, it is necessary to develop scientifically based methods and techniques for managing power consumption in various operating modes. To ensure the continuous operation of the power supply system of the object of the regional electro-technical complex as a whole, at all its levels, it is necessary to implement the procedure of energy rationing. To collect accurate and timely information, it is proposed to use a device for security-restricting power consumption of objects developed under the guidance of Professor V.I. Gnatyuk, and a database.

Key words: security rationing, emergency situations, energy management system, regional electro-technical complex, electrical supply levels, electrical energy, electrical supply security, database.

На всех стадиях своего развития человек был тесно и неразрывно связан с окружающим миром. На рубеже XXI века человечество всё больше и больше сталкивается с проблемами, возникающими при проживании в высокоиндустриальном обществе. Вмешательство в природу резко усилилось, его объём расширился, оно стало многообразнее и грозит стать глобальной опасностью для человечества. Практически ежедневно в различных уголках нашей планеты возникают так называемые «чрезвычайные ситуации» (ЧС).

Особым районом Российской Федерации, в котором могут возникнуть ЧС в энергосистеме, является Калининградская область, так как данный регион энергетически зависим от соседних государств. Надёжность и безотказность её регионального электротехнического комплекса (РЭК) напрямую зависят от транзитных перетоков мощности и энергии, а также взаимоотношений со странами-транзитёрами. В связи с этим бесперебойное электроснабжение является первостепенной задачей для обеспечения различных сфер жизнедеятельности Калининградской области. Региональный электротехнический комплекс – ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценнологическими свойствами взаимосвязанная

совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель оптимального управления электропотреблением.

Одним из видов ЧС являются аварии в энергосистеме: неблагоприятные события на генерирующих, передающих, распределяющих компонентах электроэнергетических систем, вызывающие снижение уровня или прекращение энергообеспечения гражданских, промышленных и оборонных комплексов, что создаёт угрозы жизни и здоровью людей, функционированию жизненно важных объектов.

Кроме того, в настоящее время современные электроэнергетические системы являются настолько сложными объектами с разнообразными обратными связями и факторами взаимовлияния, что решение любых вопросов, связанных с проектированием, управлением и эксплуатацией объектов электроэнергетики, немыслимо без использования мощного аппарата вычислительной математики и всех видов вычислительной техники, систем связи и телекоммуникаций.

Таким образом, для недопущения возникновения ЧС техногенного характера при эксплуатации систем электроснабжения объектов РЭК необходима разработка научно обоснованных

методов и методик управления электропотреблением в различных режимах функционирования.

В работах профессора Б.И. Кудрина показано, что при рассмотрении системы электроснабжения объекта РЭК в целом можно выделить шесть уровней электроснабжения (Рисунок 1).

Первый уровень – отдельный электроприёмник, агрегат (станок) с многодвигательным приводом или другой группой электроприёмников, связанных технологически или территориально и образующих единое изделие с определённой (документально обозначенной заводом-изготовителем) паспортной мощностью.

Второй уровень – щиты распределительные напряжением до 1 кВ. переменного тока и до 1,5 кВ постоянного тока, щиты управления, шкафы силовые, вводно-распределительные устройства, шинные выводы, магистрали.

Третий уровень – щит низкого напряжения трансформаторной подстанции 10(6)/0,4 кВ или сам трансформатор (при рассмотрении следующего уровня – загрузка трансформатора с учётом потерь в нем).

Четвёртый уровень – шины распределительной подстанции РП 10(6) кВ (при рассмотрении следующего уровня – загрузка РП в целом).

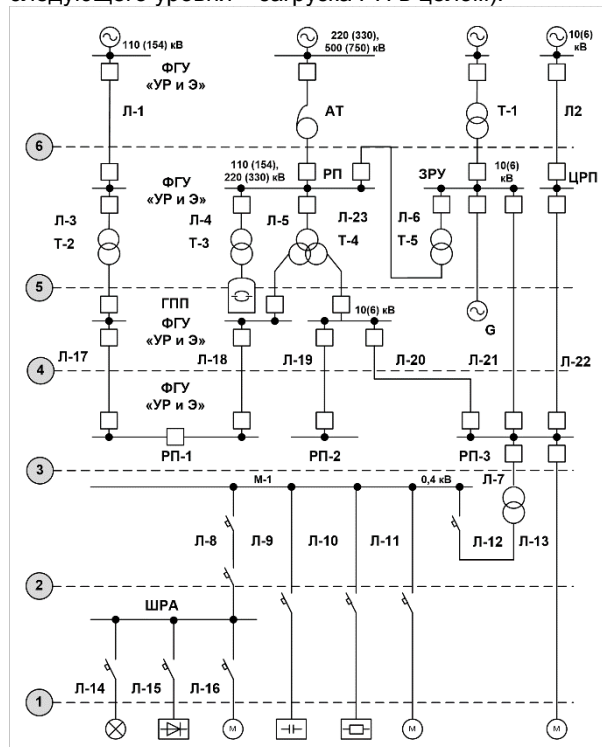


Рис. 1. Уровни электроснабжения объекта РЭК

Пятый уровень – шины главной понизительной подстанции, подстанции глубокого ввода, опорной подстанции района.

Шестой уровень – граница раздела предприятия и энергосистемы.

Анализ уровней системы электроснабжения показал, что для обеспечения непрерывного функционирования системы электроснабжения объекта РЭК в целом, на всех её уровнях, необходимо реализовать процедуру режимного

нормирования электропотребления, которая является частью методики оптимального управления электропотреблением РЭК (Рисунок 2).

Под процедурой режимного нормирования понимаются совокупность алгоритмов нормирования электропотребления потребителей, принадлежащих уровням электроснабжения, в особых режимах функционирования и ЧС, характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Методика оптимального управления электропотреблением РЭК имеет достаточно широкий математический аппарат функционального анализа данных по электропотреблению, который позволяет реализовать процедуру режимного нормирования с достаточной точностью.

Однако вопрос сбора точной и своевременной информации об электропотреблении на всех уровнях электроснабжения недостаточно проработан. С этой целью на объектах РЭК предлагается использовать разработанное под руководством профессора В.И. Гнатюка устройство для режимного ограничения электропотребления объектов РЭК (Рисунок 3).

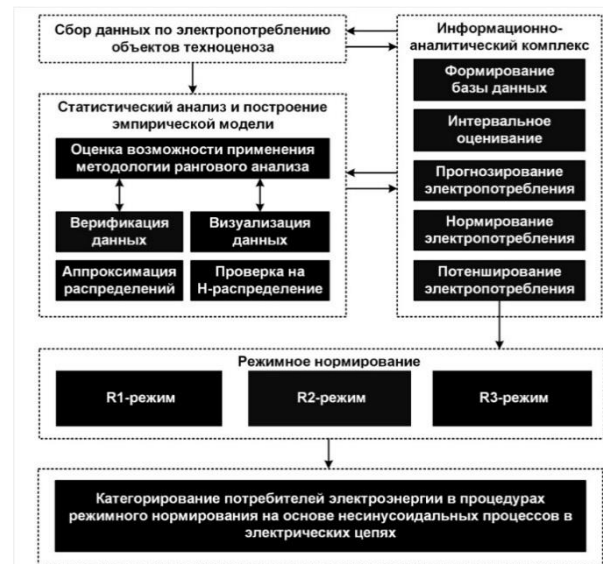


Рис. 2. Место процедуры режимного нормирования в методике оптимального управления электропотреблением РЭК

Получение данных с места, где установлено данное устройство, осуществляют датчики измерения напряжения, тока и частоты, подключенные к аналоговому интерфейсу микропроцессора, выполненные в виде амперметра и вольтметра. К другим цифровым входам аналогового интерфейса подключена энергонезависимая память, она хранит информацию о величине потребляемого тока, его частоте, напряжении, вычисленной мощности и выявленных критических ситуациях за каждые предыдущие интервалы времени работы системы, установленные оператором. Все эти данные хранятся в форматах CSV или XLS, с указанием даты и времени текущего часового пояса.

Связь с сервером и локальной сетью обеспечивают мультисканальный дуплексный цифровой модем для силовой линии, Ethernet-WiFi-Bluetooth-чипсет с поддержкой открытых стандартов 433 МГц и 968 МГц. Данные устройства предназначены для формирования «WEB-радио-интерфейса», отладки работы устройства и автоматического построения самоорганизующейся «mesh-сети» аналогичных устройств. Так же в устройстве находятся литий-полимерный источник питания для блока измерения времени и источник питания от стационарной электрической сети общего назначения. Для управления доступом потребителя к стационарной электрической сети общего назначения встроено электромагнитное реле.

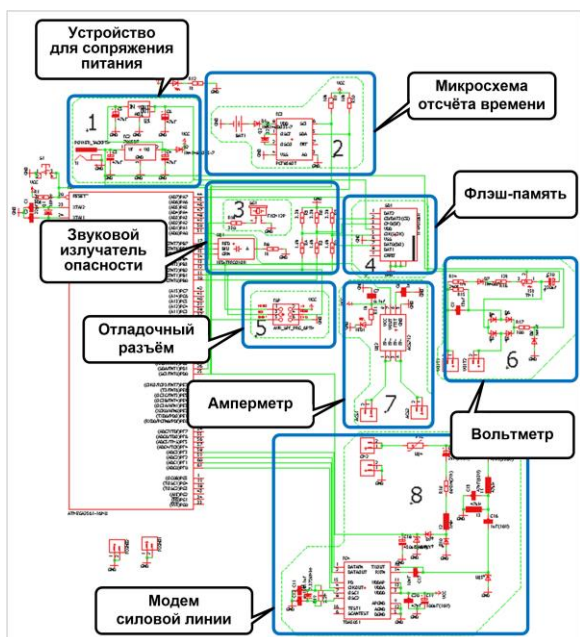


Рис. 3. Базовая схема устройства для режимного ограничения электропотребления объектов РЭК

Полученные данные с устройств для режимного ограничения электропотребления объектов РЭК поступают в базу данных для управления электропотреблением при эксплуатации объектов РЭК [1, 2]. База данных включает в себя систематизированную совокупность таблиц, в которых содержится основная информация о предприятиях, его зданиях и сооружениях, подстанциях и электростанциях, линиях электропередач.

Кроме того, база данных содержит сведения об идентификаторах устройств электроприёмников и приборов, подключённых к электрической сети, информацию о состоянии включения и выключения оборудования, а также распределении электроприёмников по группам электроснабжения. Основное предназначение базы данных – это накопление, хранение и управление информацией о потребителях электроэнергии на объектах РЭК. В основные таблицы базы данных: Список зданий и сооружений, Категории по надёжности электроснабжения, Список фидеров, Группы электропотребления, Идентификаторы

устройств, Виды оборудования, Виды идентификаторов, Список линий электропередач, Приборы, подключённые к электрической сети (перечень оборудования), Электропотребление, Список комнат (помещений), Список устройств сбора, Список подстанций, Состояние «вкл / выкл» оборудованы.

База данных фактически способна описать всю энергосистему объекта. Она хорошо иллюстрирует связь, начиная от поставщика электроэнергии до конечного потребителя, детально описывает потребителя электроэнергии, то есть даёт полную информацию об электропотреблении, о приборе, его марке и модели, включено или выключено питание на розетке, где расположен данный потребитель и к какой категории относится. База данных хранит своего рода «отпечаток пальца» потребителя – его уникальный определитель, что и помогает идентифицировать прибор в случае применения процедуры режимного нормирования.

На основе информации из базы данных реализуется процедура нормирования электропотребления объектов РЭК в особых режимах функционирования, характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Режимы определяются внешними ресурсными ограничениями и, как правило, носят временный характер.

Различают следующие режимы функционирования РЭК: R3-режим частичного ограничения, при котором на всех объектах должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители третьей категории – второстепенные потребители, непосредственно не оказывающие влияния на выполнение объектов основных задач; R2-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей третьей категории, должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители второй категории – потребители, отключение которых не оказывает влияния на выполнение объектов основных задач в течение определенного промежутка времени; R1-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей второй и третьей категорий, должны быть принудительно отключены от электроснабжения потребители первой категории – потребители, определяющие выполнение объектами основных задач [2, 3].

R3-режим не ограничен по времени (в рамках общего периода ресурсных ограничений) и не приводит к снижению основной функциональности. R2-режим приводит к частичному снижению функциональности и должен быть ограничен промежутком времени, в течение которого допустимо заданное снижение функциональности и происходит восстановление R3-режима. R1-режим приводит к существенному снижению функциональности и должен быть ограничен предельно коротким промежутком времени, в течение которого должно осуществляться бесперебойное электроснабжение особой группы потребителей первой категории и восстановление R2-режима (с последующим восстановлением R3-режима).

Целью режимного нормирования является формирование плана ресурсных ограничений каждого из объектов РЭК во всех режимах.

Исследования здесь проводятся с помощью аппарата R-распределений РЭК, под которыми понимаются ранговые параметрические распределения РЭК по электропотреблению, построенные для условий особых режимов функционирования (R-режимов), характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Различают следующие основные виды R-распределений: R3-распределение, которое строится для условий R3-режима, R2-распределение – для R2-режима и R1-распределение – для R1-режима [4, 5] (Рисунок 4). С целью расчета добавочного ресурса для каждого режима функционирования, исходя из анализа графиков плановых отключений потребителей электроэнергии, определяется результирующее расчетное электропотребление каждого объекта РЭК. Из полученных расчетных значений для каждого временного интервала формируется трансформированный вектор рангового параметрического распределения (R-распределение).

Заключение

Для обеспечения непрерывного функционирования системы электроснабжения

объекта РЭК в целом, на всех её уровнях, необходимо реализовать процедуру режимного нормирования электропотребления, которая является частью методики оптимального управления электропотреблением РЭК.

Полученные данные с устройств для режимного ограничения электропотребления объектов РЭК поступают в базу данных для управления электропотреблением при эксплуатации объектов РЭК.

База данных включает в себя систематизированную совокупность таблиц, в которых содержится основная информация о предприятиях, его зданиях и сооружениях, подстанциях и электростанциях, линиях электропередач. На основе информации из базы данных реализуется процедура нормирования электропотребления объектов РЭК в особых режимах функционирования, характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Режимы определяются внешними ресурсными ограничениями и, как правило, носят временный характер.

Целью режимного нормирования является формирование плана ресурсных ограничений каждого из объектов РЭК во всех режимах.

Литература

1. Гнатюк, В.И. Интеллектуальные технологии мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3 (37), Т.1. с. 138-135.
2. Гнатюк, В.И. Интеллектуальные технологии мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3 (37), Т.1. с. 130 –134.
3. Кивчун, О.Р. Методика управления электропотреблением при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса Калининградской области на основе системных свойств потенциала энергосбережения / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, С.А. Дорофеев // Промышленная энергетика. 2017. № 10. с. 58-65.
4. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / В.И. Гнатюк. 2-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2014].
5. Гнатюк В.И. О стратегии развития регионального электроэнергетического комплекса Калининградской области / В.И. Гнатюк // Балтийский регион. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2010. № 1 (3). с. 67-77. Web of Science.

References

1. Gnatyuk, V.I. Intellectual technologies for monitoring electrical consumption of objects of the port electrical engineering complex. V.I. Gnatyuk, OR Kivchun. Marine Intellectual Technologies. 2017. No. 3 (37), T.1, pp 138-135.
2. Gnatyuk, V.I. Intellectual technologies for monitoring electrical consumption of objects of the port electrical engineering complex V.I. Gnatyuk, OR Kivchun. Marine Intellectual Technologies. 2017. No. 3 (37), T.1. pp. 130-134.
3. Kivchun, OR The method of power management in the operation of objects of the regional electrotechnical complex of the Kaliningrad region based on the system properties of the energy-saving potential / V.I. Gnatyuk, OR Kivchun, S.A. Dorofeev. Industrial Energy. 2017. № 10, pp 58-65.
4. Gnatyuk V.I. The law of optimal construction of technocenosis [Monograph]. V.I. Gnatyuk. 2nd ed., Pererab. and add. Electronic text data. Kaliningrad: [Publishing house CEC "Technocenosis"], [2014].
5. Gnatyuk V.I. On the strategy of development of the regional power complex of the Kaliningrad region / V.I. Gnatyuk. Baltic region. - Kaliningrad: Publishing house BFU them. I. Kant, 2010. No. 1 (3). pp. 67-77. Web of Science.

УДК 372.881.1

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ КАК ИНСТРУМЕНТАРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО РЕЧЕВОГО НАВЫКА СТУДЕНТОВ МОРЕХОДНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Таджудин Абдулхамид

аспирант кафедры теории и методики профессионального образования
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, д. 1
e-mail: tdeenabd@gmail.com

Игорь Давидович Рудинский

доктор педагогических наук, профессор
профессор кафедры систем управления и вычислительной техники
Калининградский государственный технический университет,
профессор Института образования ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»
Калининград, Россия,
e-mail: idru@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена проблематике формирования иноязычных коммуникативных навыков студентов морского вуза. Особое внимание уделяется специфике формирования и развития их англоязычного речевого навыка, необходимого для межличностного общения при осуществлении профессиональной деятельности в иноязычной среде. Предлагается инновационная концепция формирования англоязычного речевого навыка студентов мореходных направлений подготовки с использованием современных информационных и коммуникационных технологий. Ставятся задачи практической реализации этой концепции и описывается процесс их решения. Представлен компонентный состав профессиональной компетенции преподавателя английского языка, необходимой для эффективного педагогического применения рассматриваемой технологии, а также сформулированы педагогические условия ее интеграции в образовательный процесс. В качестве одного из результатов представляется пилотный специализированный тематический курс «Необходимый ремонт и осмотр повреждений» для формирования англоязычного речевого навыка студентов-судомехаников. Описываются результаты педагогического эксперимента, подтвердившего эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: технический вуз, мореходное направление подготовки, английский язык, компьютерная поддержка изучения языков, формирование речевого навыка, автоматическое распознавание речи

ASR TECHNOLOGY AS A TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF ENGLISH SPEECH SKILL AMONG STUDENTS PURSUING A NAUTICAL DEGREE

Tadzjudin Abdulkhamid

Postgraduate Student at the Department of Theory and Methodology of Vocational Education
Baltic Fishing Fleet State Academy
Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, ul. Molodyozhnaya, 6
e-mail: tdeenabd@gmail.com

Igor D. Rudinskiy

DSc in Education, Professor at the Department of Control Systems and Computer Engineering
Kaliningrad State Technical University
Professor at the Institute of Education
I.Kant Baltic Federal university
Kaliningrad, Russia
e-mail: idru@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to the problems of development of foreign language communicative skills among students of the maritime university. Particular attention is paid to the specific character of the formation and development of their English language skills necessary for interpersonal communication in professional activities in a foreign language environment. An innovative concept of the formation of English language speech skills among students pursuing nautical degrees using modern information and communication technologies has been proposed. The tasks of practical realization of this concept have been set and the process of their solution has been described. The component structure of the

professional competence of an English teacher necessary for the effective pedagogical application of the technology in question has been presented, and the pedagogical conditions for its integration into the educational process have been formulated. As one of the results, a special pilot thematic course "Necessary repair and inspection of damages" has been presented for the development of English language skills among students- ship mechanics. The results of the pedagogical experiment that confirmed the effectiveness of the proposed approach have been described.

Key words: technical university, nautical degree, English language, computer-supported language learning, speech skill development, automatic speech recognition.

Проблематика формирования иноязычной коммуникативной компетенции в процессе профессиональной подготовки студентов вуза актуальна в любой исторический период и является одним из важных приоритетов реализации современных федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС). Для выпускников вузов, осуществляющих подготовку по мореходным направлениям подготовки (судоводители, радиоинженеры, специалисты по судовой автоматике, логисты и т.д.) языковая подготовка в морском вузе ориентирована на решение следующих задач: 1) формирование и развитие умений и навыков интерактивного взаимодействия выпускников с носителями других культур; 2) развитие гуманного межнационального общения; 3) приобщение обучающихся к мировой культуре, процессу глобализации [6].

Важная особенность профессиональной реализации мореходного образования состоит в частом пребывании за границей и необходимости общаться на языке международного общения, которым является английский язык. При недостаточной англоязычной речевой подготовке выпускнику морского вуза, оказывается чрезвычайно сложно или просто невозможно исполнять свои трудовые функции, связанные с общением с представителями иностранных государств.

Проблематике исследования иноязычной подготовки студентов вузов уделяется серьезное внимание. В частности, в работах В.Н. Андреева [1], И.В. Севастьяновой [15], Е.В. Цибульской [16], С.Е. Моторной [10], Ю.И. Божко [2], В.Н. Зыковой [9], Х.С. Галиевой, С.Г. Гавриловой, А.В. Дмитриченко [3], Л.Г. Ступиной [14], Р.В. Дражан [5], Ю.С. Котовой, С.Н. Паутовой [6] и др. ставятся и решаются задачи разработки и применения в образовательном процессе организационных и методических средств обеспечения межкультурной и профессиональной коммуникации средствами английского языка студентов морских вузов.

Авторы работы [6] указывают, что содержание процесса формирования у обучающихся морского вуза иноязычной коммуникативной компетентности определено в двух аспектах:

1) общее владение языком (англ. *General Language*), т.е. развитие навыков устной разговорно-бытовой речи;

2) владение языком для специальных целей (англ. *Language for Specific Purposes*), т.е. развитие навыков публичной речи.

Авторы всех проанализированных нами публикаций отмечают, что умение объясняться на английском языке необходимо выпускникам мореходных направлений для успешного выполнения трудовых функций. В то же время,

многие работодатели и сами выпускники мореходных направлений отмечают недостаточный уровень англоязычного речевого навыка, сформированного в вузе [7, 8].

На наш взгляд, проблема заключается в недостаточном внимании, уделяемом в вузе формированию этого навыка, а также в низкой эффективности применяемых дидактических средств. Традиционно, при изучении иностранного языка усиленное внимание уделяется расширению словарного запаса, освоению основных грамматических правил, а также выработке умения переводить тексты с иностранного на родной язык [4]. Для этого используются такие десятилетиями апробированные педагогические технологии, как аудирование, перевод текста, заучивание грамматических правил и т.п. [4]. Внимание практически не уделяется. Как следствие, важнейший компонент коммуникативной иноязычной компетенции, которым является способность изъясняться и поддерживать разговор на иностранном языке, оказывается недостаточно сформированным. Для устранения этого недостатка соискателю должности, предусматривающей общение на иностранном языке, приходится затрачивать значительное время (а чаще всего – и нести большие финансовые затраты).

На наш взгляд, такое положение обусловлено следующими причинами:

1. Устаревшие образовательные методики, не предусматривающие формирование требуемого уровня речевого иноязычного навыка.

2. Требования к содержанию образовательных программ изучения иностранного языка формулируются преподавателями профильных языковых дисциплин без должного согласования с потенциальными работодателями и преподавателями дисциплин профессионального цикла.

3. Недостаточная компетенция преподавателей иностранного языка в сфере современных образовательных информационных и коммуникационных технологий (ИКТ).

4. Отсутствие возможности организовать систематическое общение студентов с носителями изучаемого языка.

С учетом отмеченных и иных недостатков многие отечественные и иностранные организации профессионального образования исследуют возможности внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, в первую очередь, связанных с применением компьютерных систем [12]. Речь идет о применении на различных стадиях обучения систем компьютерной поддержки изучения языков (англ. *Computer-Assisted Language Learning – CALL*) [12].

Тем не менее, Системы компьютерной поддержки достаточно активно применяются в образовательном процессе морских вузов, в частности, для моделирования различных судовых систем [1, с. 149] и систем управления движением судна [1], а также для тренажерной подготовки будущих специалистов [1, 11], однако нам не удалось найти публикации, отражающие опыт их применения для формирования англоязычного речевого навыка выпускников мореходных направлений.

В современной методике преподавания для развития речевого навыка большое распространение получил интерактивный метод, заключающийся в организации и развитии диалогового общения, которое ведет к взаимопониманию, взаимодействию, к совместному решению общих, но значимых для каждого участника задач.

Одной из перспективных технологий, успешно реализуемых в CALL-системах и привлекающих интерес как исследователей методологии обучения иностранным языкам, так и практикующих преподавателей, является технология автоматического распознавания речи (англ. Automatic Speech Recognition – ASR) [12]. Суть ее состоит в том, что компьютер распознает и анализирует речь говорящего в реальном времени и с оптимальной точностью с учетом, во-первых, индивидуальных речевых особенностей и/или акцента и, во-вторых – естественных шумовых помех.

Возможности применения ASR-технологии для повышения качества обучения иностранным языкам интенсивно изучаются многими зарубежными специалистами. Так, анализ эффективности применения этой и других компьютерных технологий в рамках обучения языкам с использованием CALL-систем стал предметом исследований [12, 17]. ASR-технология в качестве инструментария для формирования различных языковых навыков рассматривается в работах [18, 19].

Наиболее важным, на наш взгляд, является получение ответов на следующие вопросы: 1) насколько эффективна ASR-технология как средство достижения конкретных педагогических целей? 2) существует ли возможность оценить эту эффективность количественно? Ответить на эти вопросы можно путем решения следующих конкретных задач:

1. исследовать, на какие факторы устной речи влияет ASR-технология и в чем выражается это влияние;
2. провести сравнительный анализ электронных образовательных ресурсов, в которых реализована ASR-технология, с позиций их применимости в образовательном процессе при изучении английского языка;
3. сформулировать основу и содержание компетенции преподавателя вуза, необходимой и достаточной для использования ASR-технологии в образовательном процессе;
4. сформулировать педагогические условия, в которых реализация ASR-технологии будет способствовать повышению эффективности обучения студентов английскому языку, также организовать и провести педагогический

эксперимент для обоснования и подтверждения полученных результатов.

В результате проведенного анализа научной литературы нами выделены факторы устной речи, которые могут быть сформированы при систематическом применении CALL-систем (в частности, ASR-технологии). Реализация ASR-технологии способствует улучшению произношения и особенно просодии – расстановки ударений, интонаций, темпа, выразительности, ритма, акцента и других средств «речевой раскраски».

В результате проведенного теоретического анализа научной литературы в качестве наиболее перспективного инструментального средства поддержки формирования англоязычного речевого навыка студентов морского вуза нами выбран программный продукт «МуЕТ» [13]. Этот выбор произведен на основании четырехэтапного анализа широкого спектра программных ASR-продуктов, в том числе на соответствие педагогическим условиям, сформулированным в работе [13].

В рамках определения структуры и содержания предлагаемой компетенции нами выделены следующие ее компоненты: когнитивный – знание принципов функционирования, областей и способов применения предметно ориентированных электронных образовательных ресурсов (ЭОР); Функциональный – умение применять инструментальные средства предметно ориентированного ЭОР для планирования и организации проведения занятий по изучению иностранного языка; мотивационный – стремление к профессиональному самообразованию в аспекте обновления уже применяемых и/или освоения и внедрения в образовательный процесс новых предметно ориентированных ЭОР; личностный – креативность, целеустремленность, любознательность, высокий уровень владения преподаваемым иностранным языком.

Нами сформулированы педагогические условия применения технологии автоматического распознавания речи для формирования и развития англоязычного речевого навыка студентов мореходных направлений подготовки. Среди наиболее важных отметим такие условия, как: организационно-педагогические – наличие необходимой аппаратно-программной базы, наличие академической лицензии на специализированное программное обеспечение; психолого-педагогические – наличие специализированного методического обеспечения для проведения как аудиторных занятий (в специализированной лаборатории); дидактические – создание методики и системы оценивания учебных достижений обучающихся.

В рамках реализации этих условий разработано методическое обеспечение реализации предлагаемого подхода, которое включает: учебно-методическое пособие к практическим занятиям для студентов, изучающих английский язык в качестве иностранного языка; методические рекомендации для преподавателей по подготовке, организации и проведению занятий с применением технологии автоматического распознавания речи.

В настоящее время в рамках реализуемого нами подхода разрабатывается пилотный специализированный тематический курс

«Необходимый ремонт и осмотр повреждений» для формирования англоязычного речевого навыка студентов, обучающихся по направлению подготовки судомехаников. В рамках этого курса студенты будут участвовать в обсуждении ремонтных работ. Обсуждение включает в себя согласование списка ремонтных работ с представителями судоремонтного завода, проверку объема работ, контроль и проверку качества ремонта. В рамках курса предусматривается ведение диалога между капитаном судна, представителем судостроительного завода, начальником инженерной службы и суперинтендантом.

Для оценивания эффективности применения технологии автоматического распознавания речи в образовательном процессе нами проведен педагогический эксперимент на кафедрах иностранных языков ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» и его структурного подразделения «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота». В первой фазе эксперимента в период с 28.04.2017 по 02.06.2017 участвовали 60 студентов первого и второго курсов. Во второй фазе эксперимента в период с 28.02.2018 по 17.04.2018 участвовали 160 студентов первого курса. Все участвовавшие в педагогическом эксперименте студенты распределялись случайным образом на экспериментальную и контрольную группы.

Суть эксперимента заключалась в исследовании результативности применения технологии автоматического распознавания речи в образовательном процессе для повышения эффективности формирования англоязычных речевых навыков у студентов морского вуза при изучении иностранного (в частности, английского) языка. В роли экспертов выступали преподаватели иностранного языка.

Для реализации поставленной цели и верификации выдвинутой гипотезы эксперимент был организован следующим образом:

1. На организационном этапе эксперимента были определены участники, создана программно-техническая среда его проведения и определены показатели, по которым может оцениваться сформированность каждого проверяемого компонента англоязычного речевого навыка;

2. На констатирующем этапе эксперимента проводился входной контроль сформированности каждого проверяемого компонента англоязычного речевого навыка в контрольной и экспериментальной группе студентов;

3. На формирующем этапе проведены занятия по изучению иностранного (английского) языка со студентами экспериментальных групп с применением ASR-технологии, а со студентами контрольных групп – с применением традиционной образовательной технологии;

4. На контрольном этапе проведен итоговый контроль сформированности каждого проверяемого

компонента англоязычного речевого навыка в экспериментальных и контрольных группах студентов;

5. На аналитическом этапе с применением методов математической статистики были выявлены существенные и значимые различия сформированности каждого проверяемого компонента англоязычного речевого навыка в экспериментальных и контрольных группах студентов. Поскольку в ходе формирующего этапа педагогического эксперимента организация занятий в экспериментальной и контрольной группах явно различалась только реализуемой дидактической технологией (автоматического распознавания речи с применением программного продукта МуЕТ и традиционной технологией соответственно), результаты эксперимента позволили сделать вывод об эффективности применения ASR-технологии в образовательном процессе при формировании англоязычного речевого навыка у студентов морского вуза [20].

Заключение

Обучение иностранным языкам студентов мореходных направлений подготовки, обучающихся в российских морских вузах – одна из наиболее актуальных задач, скорейшее решение которой необходимо для более интенсивного и результативного обмена знаниями и технологиями в масштабах всей человеческой цивилизации.

Представленная в настоящей работе методология формирования англоязычного речевого навыка студентов мореходных направлений подготовки, основанная на технологии автоматического распознавания речи (ASR-технологии), позволяет в значительной степени компенсировать недостаток общения с носителем изучаемого языка и индивидуализировать обучение с учетом персональных особенностей каждого студента. Проведенный педагогический эксперимент убедительно продемонстрировал, что технология автоматического распознавания речи является очень удобным дидактическим средством, которое позволяет не только эффективно решать поставленную задачу, но и вызывает большой интерес студентов к ее образовательному применению, в том числе и самостоятельно.

По нашему мнению, технология автоматического распознавания речи обладает очень широким педагогическим потенциалом. В частности, наряду с формированием англоязычного речевого навыка студентов мореходных направлений подготовки, она может применяться на различных курсах повышения квалификации для достижения требуемого уровня владения иностранным языком. Еще одно очень перспективное направление педагогического применения ASR-технологии – изучение русского языка как иностранного, причем для различных возрастных категорий и исходного уровня владения целевым языком.

Литература

1. Андреев В.Н. Вопросы совершенствования тренажерной подготовки судоводителей речного флота: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19: Новосибирск, 2001. 233 с.
2. Божко Ю.И. Модель формирования иноязычной профессионально-коммуникативной компетенции обучающихся на судоводительских факультетах. Научные ведомости БелГУ. Серия: Гуманитарные науки. 2016. №28 (240).
3. Галиева Х.С. Педагогическое проектирование иноязычной подготовки морских специалистов. Х.С. Галиева, С.Г. Гаврилова, А.В. Дмитриченко. ИСОМ. 2014. №4.
4. Гуляева Н.А. Преподавание иностранных языков студентам в технических высших учебных заведениях за рубежом (Анализ и тенденции развития методов и используемых средств). // Гуманитарные научные исследования. 2016 № (4) с.169-177
5. Дражан Р.В. Историко-педагогическая репрезентация понятия «языковая компетенция»: дис. ... на соиск. уч. степ. канд. пед. наук. Ростов н/Д, 2008. 158 с.
6. Дражан Р.В. Иноязычная коммуникативная компетентность в системе профессионального образования курсантов морского вуза в аспекте реализации ФГОС-3+ // Вестник Майкопского государственного технологического университета. 2016. №3
7. Дудина М.М., Глотова Е.Е. Изучение требований работодателей к выпускникам вузов: российский и зарубежный опыт // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. 2015. №1 (5).
8. Давыденко Т.М. Роль работодателей в процессе развития профессиональных компетенций студентов при реализации учебных и производственных практик. // Современные проблемы науки и образования: электрон. науч. журн. 2012 № (2), с.1-7.
9. Зыкова В.Н. Формирование иноязычной профессионально-коммуникативной компетенции студентов судоводительских факультетов: Дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02: Санкт-Петербург, 2002. 159 с.
10. Моторная С.Е. Роль культуры в развитии нравственно-этической сферы конкурентоспособной личности будущих выпускников технического вуза в процессе профессиональной подготовки // Вестник СевГТУ. Вып. 105. Педагогика. Севастополь, 2010. С. 7-12.
11. Марков К.В. Возможные направления развития тренажера судовой энергетической установки // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2010. №2.
12. Рудинский И.Д., Абдулхамид Т. Технология автоматического распознавания речи и перспективы ее применения для обучения иностранному языку // Известия БГА РФ: Психолого-педагогические науки: научный журнал. Калининград, 2016. № 2(36).
13. Рудинский И.Д., Абдулхамид Т. Сравнительный анализ возможностей применения компьютерных систем автоматического распознавания речи при изучении иностранного языка // Известия БГА РФ: Психолого-педагогические науки: научный журнал. Калининград, 2017, № 2(40), с. 55-63.
14. Ступина Л.Г. Формирование иноязычной профессионально-коммуникативной компетентности морских специалистов в учебном комплексе «морской лицей-морской вуз: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08: Калининград, 2012. 167
15. Севастьянова И.В., Моторная С.Е. Морской специалист сегодня: связь личностных качеств с условиями работы. // Наука и современность. 2016(1):148-56.
16. Цибульская Е.В. Теория и методы профессионального языкового образования морских судоводителей: Дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.08. Новосибирск, 2001. 391 с.
17. Debski R. Analysis of research in CALL (1980–2000) with a reflection on CALL as an academic discipline // ReCALL. 2003. Т. 15. №. 2. С. 177-188.
18. Engwall O., Bälter O. Pronunciation feedback from real and virtual language teachers // Computer Assisted Language Learning. 2007. (20), 235-262.
19. Stockwell G. A review of technology choice for teaching language skills and areas in the CALL literature // ReCALL. 2007. Т. 19. №. 2. С. 105-120.
20. Рудинский И.Д., Абдулхамид Т. Экспериментальное исследование эффективности применения ASR-технологии на занятиях по изучению иностранного языка // Известия БГА РФ: Психолого-педагогические науки: научный журнал. Калининград, 2018, № 1(43), с. 121-132.

References

1. Andreev V.N. Voprosy sovershenstvovaniya trenazhernoj podgotovki sudovoditelej rechnogo flota: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.19: Novosibirsk, 2001. 233 p.
2. Bozhko YU.I. Model' formirovaniya inoyazychnoj professional'no-kommunikativnoj kompetencii obuchayushchihsya na sudovoditel'skih fakul'tetah. Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Gumanitarnye nauki. 2016. №28 (240).
3. Galieva H.S. Pedagogicheskoe proektirovanie inoyazychnoj podgotovki morskih specialistov. H.S. Galieva, S.G. Gavriloa, A.V. Dmitrichenko. ISOM. 2014. №4.
4. Gulyaeva N.A. Prepodavanie inostrannyh yazykov studentam v tekhnicheskikh vysshih uchebnyh zavedeniyah za rubezhom (Analiz i tendencii razvitiya metodov i ispol'zuemyh sredstv). Gumanitarnye nauchnye issledovaniya. 2016 № (4), pp.169-177.
5. Drazhan R.V. Istoriko-pedagogicheskaya reprezentaciya ponyatiya «yazykovaya kompetenciya»: dis. ... na soisk. uch. step. kand. pед. nauk. Rostov n/D, 2008. 158 p.

6. Drazhan R.V. Inoyazychnaya kommunikativnaya kompetentnost' v sisteme professional'nogo obrazovaniya kursantov morskogo vuza v aspekte realizacii FGOS-3+. Vestnik Majkopskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2016. №3.
7. Dudina M.M., Glotova E.E. Izuchenie trebovanij rabotodatelej k vypusknikam vuzov: rossijskij i zarubezhnyj opyt. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye issledovaniya. 2015. №1 (5).
8. Davydenko T.M. Rol' rabotodatelej v processe razvitiya professional'nyh kompetencij studentov pri realizacii uchebnyh i proizvodstvennyh praktik. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya: ehlektron. nauch. zhurn. 2012 № (2), p.1-7.
9. Zykova V.N. Formirovanie inoyazychnoj professional'no-kommunikativnoj kompetencii studentov sudovoditel'skih fakul'tetov: Dis. ... kand. ped. nauk: 13.00.02: Sankt-Peterburg, 2002. 159 p.
10. Motornaya S.E. Rol' kul'tury v razvitii nravstvenno-ehlicheskoj sfery konkurentosposobnoj lichnosti budushchih vypusknikov tekhnicheskogo vuza v processe professional'noj podgotovki. Vestnik SevGTU. Vyp. 105. Pedagogika. Sevastopol', 2010. Pp. 7-12.
11. Markov K.V. Vozmozhnye napravleniya razvitiya trenazhera sudovoj ehnergeticheskoy ustanovki. Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2010. №2.
12. Rudinskij I.D., Abdulhamid T. Tekhnologiya avtomaticheskogo raspoznavaniya rechi i perspektivy ee primeneniya dlya obucheniya inostrannomu yazyku. Izvestiya BGA RF: Psihologo-pedagogicheskie nauki: nauchnyj zhurnal. Kaliningrad, 2016. - № 2(36).
13. Rudinskij I.D., Abdulhamid T. Sravnitel'nyj analiz vozmozhnostej primeneniya komp'yuternyh sistem avtomaticheskogo raspoznavaniya rechi pri izuchenii inostrannogo yazyka. Izvestiya BGA RF: Psihologo-pedagogicheskie nauki: nauchnyj zhurnal. Kaliningrad, 2017, № 2(40), pp. 55-63.
14. Stupina L.G. Formirovanie inoyazychnoj professional'no-kommunikativnoj kompetentnosti morskikh specialistov v uchebnom komplekse "morskoy licej-morskoy vuz: dis. ... kand. ped. nauk: 13.00.08: Kaliningrad, 2012. 167.
15. Sevast'yanova I.V., Motornaya S.E. Morskoy specialist segodnya: svyaz' lichnostnyh kachestv s usloviyami raboty. Nauka i sovremennost'. 2016(1), pp. 148-56.
16. Cibul'skaya E.V. Teoriya i metody professional'nogo yazykovogo obrazovaniya morskikh sudovoditelej: Dis. ... d-ra ped. nauk: 13.00.08. Novosibirsk, 2001. 391 p.
17. Debski R. Analysis of research in CALL (1980–2000) with a reflection on CALL as an academic discipline. ReCALL. 2003. T. 15. №. 2. Pp. 177-188.
18. Engwall O., Bälter O. Pronunciation feedback from real and virtual language teachers. Computer Assisted Language Learning. 2007. (20), p. 235-262.
19. Stockwell G. A review of technology choice for teaching language skills and areas in the CALL literature. ReCALL. 2007. T. 19. №. 2. Pp. 105-120.
20. Rudinskij I.D., Abdulhamid T. EHksperimental'noe issledovanie ehffektivno-sti primeneniya ASR-tekhnologii na zanyatiyah po izucheniyu inostrannogo yazyka. Izvestiya BGA RF: Psihologo-pedagogicheskie nauki: nauchnyj zhurnal. Kaliningrad, 2018, № 1(43), pp. 121-132.

УДК 004.652 +330.3

ЕДИНАЯ МОДЕЛЬ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ РАЗЛИЧНЫХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Федор Георгиевич Майтаков

ведущий специалист технопарка КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: maitakov@mail.ru

Александр Алексеевич Меркулов

начальник технопарка КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: vsmcenose@mail.ru

Евгений Владимирович Петренко

ведущий специалист технопарка КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: petrenkoe@hotmail.com

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, начальник управления инновационной деятельности КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: yafasov@list.ru

Аннотация

Аппаратно-программные комплексы систем поддержки принятия решений класса «ситуационный центр» (СЦ) стали необходимыми инструментами в решении задач государственного управления. Следующим шагом, позволяющим увеличить качество и скорость принятия решений на различных уровнях управления (страна, субъект федерации, муниципалитет и т.д.), в дорожной карте перехода к цифровой экономике является создание системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ). Разработка отдельных СЦ с индивидуальной архитектурой, в том числе и с индивидуальной структурой хранилища данных, делает трудоемкой, а иногда и невозможной реализацию процедур информационного взаимодействия между различными СЦ. Целью данной работы является создание единой модели хранения данных из различных предметных областей для использования в ситуационных центрах СРСЦ. Создание СЦ на основе универсальной модели предметной области, имеющего типовую структуру БД и унифицированный настраиваемый интерфейс пользователя позволяет тиражировать СЦ в организациях различных: масштаба, сложности и сфер деятельности, дает возможность унифицировать информационное взаимодействие между отдельными СЦ и объединить их в СРСЦ. Тестирование предлагаемого решения при создании линейки программных комплексов государственного управления, а именно: конфигурация ситуационного центра VSM Cenose WEB «Открытый бюджет», Ситуационный центр «Электронный бюджет», Универсальный виртуальный ситуационный центр «Муниципалитет» показало ускорение работ от 2 до 5 раз.

Ключевые слова: операция, модель данных, ситуационный центр, категории операций, сущностей и связей, уровни управления в экономических системах, контроль качества процессов управления.

A UNIVERSAL DATA STORAGE MODEL OF VARIOUS SUBJECT AREAS FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS

Fyodor G. Maitakov

Head Specialist at KSTU Technopark
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: maitakov@mail.ru

Aleksandr A. Merkulov

Head of KSTU Technopark
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: vsmcenose@mail.ru

Evgeniy V. Petrenko

Head Specialist at KSTU Technopark
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: petrenkoe@hotmail.com

Abdurashid Ya. Yafasov

DSc in Engineering, Director for Innovations
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: yafasov@list.ru

Abstract

Hardware and software complexes of decision support systems of the "situational center"(SC) class have become essential tools in solving public administration tasks. The next step to increase the quality and speed of decision-making at various management levels (country, constituent region, municipality, etc.) in the roadmap of the transition to a digital economy is creation of a system of distributed situational centers (SDSC). Development of individual SCs with an individual architecture, including individual structure of the data storage, makes it difficult and sometimes impossible to implement procedures for information interaction between different SCs. The purpose of this work is to create a unified data storage model from various subject areas to be used in situational centers of the SDSC. Creation of a SC based on a universal subject area model having a typical database structure and a unified configurable user interface allows replicating SCs in organizations of various scale, complexity and areas of activity, makes it possible to unify information interaction between individual SCs and integrate them into the SDSC. Testing the proposed solution when creating a line of software systems for public administration, namely: configuration of the VSM Cenose WEB "Open Budget" situation center, "Electronic Budget" Situation Center, "Municipality" Universal Virtual Situation Center showed work intensification from 2 to 5 times.

Key words: operation, data model, situational center, categories of operations, entities and links, management levels in economic systems, quality control of management processes.

Введение

В настоящее время создание ситуационных центров (СЦ), способных обеспечивать дополнительные гибкие методы мониторинга и управления, представляет собой актуальную проблему цифровизации как экономики, так и управления [1]. Объединение СЦ различных уровней (страна, субъект федерации, муниципалитет и т.д.) в единую систему – систему распределённых СЦ – позволит руководителям повысить оперативность управления и улучшить качество решений.

Широкое внедрение СЦ сдерживается уникальностью продукта, разработка которого связана с большими временными затратами, трудоёмкостью и высокой стоимостью.

Уникальность определяется сферой деятельности организации, её масштабом, сложностью и т.д. При этом, для каждого СЦ создаётся особенная модель предметной области и, соответственно, структура базы данных (БД) и интерфейс пользователя.

Для облегчения проектирования структуры БД разработчики наиболее часто используют CASE-средства [2] или ORM-инструменты [3]. CASE-средства заменяют написание скриптов «рисованием» в дизайнера [2]. ORM-инструменты

создают объекты БД из объектно-ориентированного кода прикладной программы (так называемый метод работы «Code First») [4]. Генерируемые этими инструментами базы данных содержат сотни таблиц, имеют низкую производительность, чрезвычайно тяжелы для сопровождения.

Одновременно с этим объединение отдельных СЦ в систему распределённых СЦ становится неразрешимой проблемой: обеспечение информационного взаимодействия одного СЦ, имеющего свою особенную структуру БД, с другим уникальным СЦ является нетривиальной задачей. При разработке программного обеспечения необходимость учитывать прикладную направленность каждого отдельного СЦ исключает возможность использования типовых решений или простого тиражирования программных продуктов, что значительно увеличивает стоимость проекта. В [5] обозначены следующие проблемы, связанные с разработкой СЦ:

- ограниченность рынка ситуационных центров;
- регионально-отраслевая специфика ситуационных центров муниципального управления;
- необходимость модификации СЦ.

Все это усложняет разработку СЦ, увеличивает его стоимость, требует широкого спектра специалистов. Одним из способов решения этой

проблемы может являться использование унифицированных моделей, настраиваемых на конкретное применение [6].

Создание отдельного СЦ на основе универсальной модели предметной области, имеющего типовую структуру БД и унифицированный настраиваемый интерфейс пользователя позволит тиражировать СЦ в организациях различных: масштаба, сложности и сфер деятельности. Типовая структура БД такого СЦ даст возможность унифицировать информационное взаимодействие между отдельными СЦ и объединить их в систему распределённых СЦ. Это позволит совершить прорыв в электронном управлении.

В данной работе рассмотрена универсальная модель предметной области для ситуационных центров и её реализация в реляционной БД.

Модель предметной области для ситуационных центров

Наиболее часто при разработке БД для СЦ используются реляционная модель данных [7, 8], универсальная модель данных [9] и матричная универсальная объектно-реляционная БД [10]. Выбор реляционной модели потребует от разработчиков полного её перепроектирования [11] при переходе к другой предметной области. Две другие модели данных имеют следующие недостатки [9]:

- сложные запросы;
- низкое быстродействие;
- отсутствие декларативных ограничений целостности.

Предлагается другой подход, который был выработан в ходе многолетнего опыта создания СЦ в различных предметных областях. Он заключается в том, что модель абстрактной предметной области описывается в реляционной БД. Эта модель получила название «Категории операций, сущностей и связей» (КОСС) [12]. Основные её понятия – категории, операции, сущности, связи. Сущности являются единицами информации, связи определяют отношения между двумя или тремя сущностями, операции – это любые процедуры, меняющие связи между сущностями предметной области, сами сущности или их свойства.

Сущности, операции и связи разбиваются на категории.

К категориям сущностей в предметной области относятся: субъекты, объекты, территории, основания, действия – понятия, универсальные для всех предметных областей. В зависимости от специфики предметной области количество категорий может по необходимости увеличиваться. Каждая категория сущностей в свою очередь распадается на типы, например, субъекты – на «физические лица», «юридические лица» и т.д.

Операции и связи также распадается на категории, определяемые категориями задействованных в операциях и объединяемых связями сущностей, и имеют свои типы, например,

«накладная», «приходный кассовый ордер», «поставщик», «студент», «входит в» и т.д.

При реализации модели КОСС в реляционной БД все сущности предметной области (субъекты, объекты, территории, основания, действия и другие) с их общими полями («id», «категория», «тип», «код», «псевдоним», «название», «от», «до») хранятся в одной таблице «Сущности». Кластеризованным ключом этой таблицы является набор полей «категория», «тип», «id». Это позволяет обеспечить быстрый отбор всех сущностей, заданных категории и типа. Прочие поля, специфические для каждой категории, хранятся в таблицах расширения, соответствующих категориям.

Элементы базы данных модели КОСС

В рамках данной статьи рассмотрим только основные таблицы и их взаимосвязи в БД модели КОСС.

Основными таблицами БД модели КОСС являются:

- 1) «Категории»;
- 2) «ТипыСущностей»;
- 3) «Сущности»;
- 4) «ТипыСвязей»;
- 5) «Связи»;
- 6) «ТипыДокументов»;
- 7) «Документы»;
- 8) «ЕДИЗМЫ»;
- 9) «Операции».

Записи первых пяти таблиц («Категории»/«ТипыСущностей»/ «Сущности» и «ТипыСвязей»/«Связи») представляют собой сущности предметной области и связи между ними.

Последние четыре таблицы («ТипыДокументов», «Документы», «ЕДИЗМЫ» и «Операции») представляют собой операции предметной области. Для проведения любой операции необходимо оформить документ (каждый документ имеет свой тип, например, накладная, акт выпуска готовой продукции и т.д.). Каждый документ объединяет несколько операций.

Диаграмма взаимосвязей основных таблиц (с их примерной структурой) реализации модели КОСС в реляционной БД приведена на рисунке 1. На этом рисунке символы ключей напротив названий столбцов таблиц обозначают, что в этом столбце для каждой строки хранится уникальное числовое значение. Логическое отношение между таблицами показано ломанной линией, которая имеет символы ключа на одном конце и бесконечности (∞) на другом, и означает отношение «один ко многим» или «1:N».

Записи таблицы «Связи» имеют три ссылки на записи таблицы «Сущности» – ведущая, ведомая и основание. Ведущая и ведомая сущности являются обязательными, основание – необязательным.

Документы и операции имеют ссылки на сущности (документ – две, операция – одну). Записи таблицы «Сущности», на которые ссылаются записи таблицы «Документы», являются субъектами операции, а записи таблицы «Операции» – её объектом.

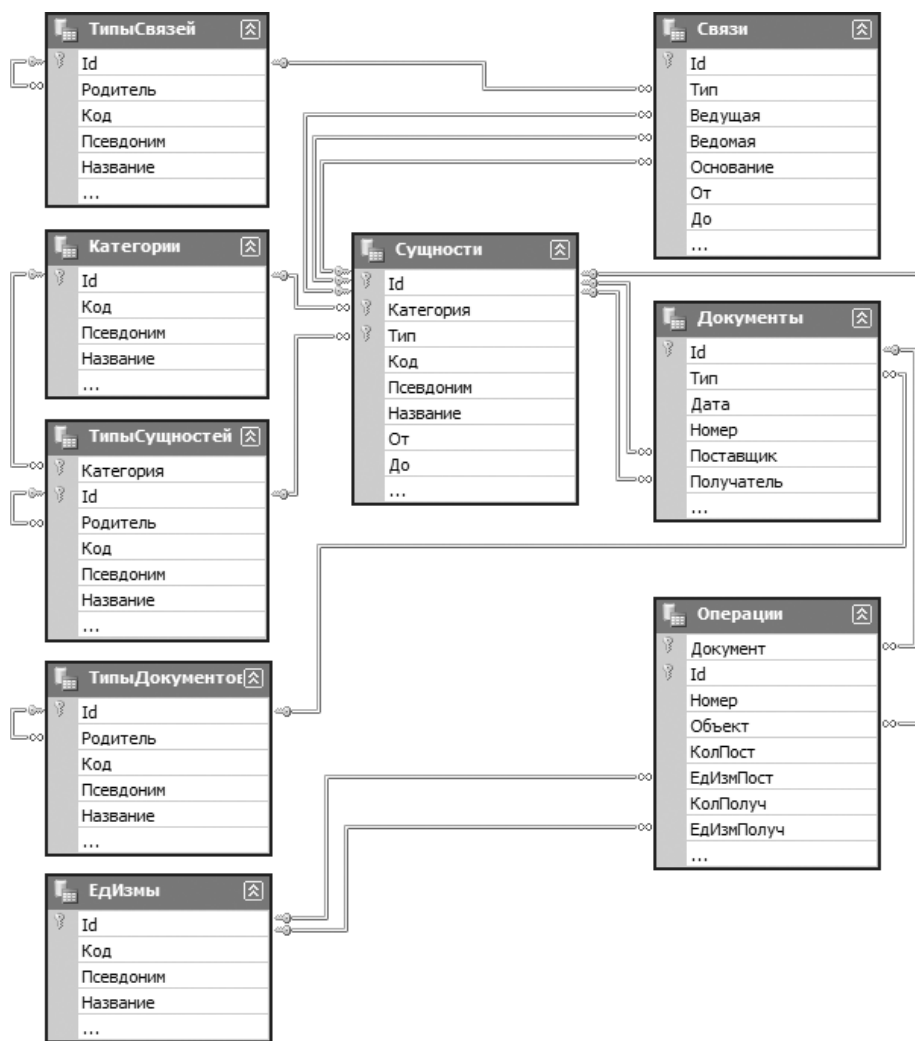


Рис. 1. Взаимосвязи основных таблиц реализации модели КОСС в реляционной БД

Субъектами операции являются поставщик и получатель. Если они совпадают (т.е. поставщик равен получателю), то это означает, что операцию производит один субъект.

Каждому субъекту операции (и поставщику, и получателю) для каждого объекта операции указываются свои количество и единица измерения («КолПост»/«ЕдИзмПост» и «КолПолуч»/«ЕдИзмПолуч» соответственно). Если субъекты операции разные, то, обычно, количества и единицы измерения объекта операции совпадают. Если же субъект операции один – то, обычно, количества и единицы измерения объекта операции различаются. Первый случай, как правило, является операцией смены владельца объекта (изменения связей), второй – изменением самого объекта операции (изменение свойств объекта), при этом, обычно, документ группирует несколько операций.

Наличие в модели КОСС операций позволяет учитывать динамику взаимодействия между сущностями предметной области, что является значимым для многих информационных систем и особенно для ситуационных центров.

Таблица «ТипыСущностей» будет содержать названия типов объектов предметной области. Таблица «Сущности» будет содержать сами объекты предметной области. Таблица «Связи»

будет содержать отношения между объектами предметной области.

Например, в предметной области образование в таблице «ТипыСущностей» будут храниться записи: «образовательная организация», «факультет», «кафедра» и т.д. Таблица «Сущности» будет содержать сами образовательные организации, факультеты, кафедры и т.д. При смене предметной области структура БД остаётся неизменной, а меняется только контент её таблиц.

Поскольку в реляционной БД, реализующей модель КОСС, хранится информация об объектах предметной области, сами объекты предметной области и связи между ними, то это позволяет использовать кластеризованные индексы, декларативные ограничения целостности данных. Таким образом обеспечивается надёжность хранения данных и высокое быстродействие БД.

Для формализации модели данных КОСС введём следующие обозначения:

p_{ij} – j -е свойство i -й сущности/связи;

$P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$ – набор свойств i -й сущности/связи;

e_i – i -я сущность;

$E_i = \langle e_i, P_i \rangle = \langle e_i, \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\} \rangle$ – i -я сущность с n свойствами;

r_i – i -я связь;

$R_i = \langle r_i, P_i \rangle = \langle r_i, \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\} \rangle$ – i -я связь с m свойствами;

$E_i R_l E_j$ – l -я связь, устанавливающая взаимоотношение между двумя сущностями – i -й и j -й;

$E_i R_l E_j R_k E_k$ – l -я связь, устанавливающая взаимоотношение между тремя сущностями – i -й, j -й и k -й.

Тогда t -я операция O_t – есть преобразование из набора n -сущностей (и их свойств) и m -связей (и их свойств) в набор k -сущностей (и их свойств) и l -связей (и их свойств):

$$\langle E_1, E_2, \dots, E_n, R_1, R_2, \dots, R_m \rangle \xrightarrow{O_t} \langle E_1, E_2, \dots, E_k, R_1, R_2, \dots, R_l \rangle$$

Реализация модели «Категории операций, сущностей и связей» в СЦ «Открытый бюджет Калининградской области»

Предложенный подход был реализован при разработке СЦ в государственных органах власти Калининградской области РФ. Рассмотрим результат использования модели КОСС при создании СЦ «Открытый бюджет Калининградской области» (доступен в сети Интернет по адресу: <https://sc.gov39.ru>).

Субъектами регионального бюджетного процесса являются:

- высшие должностные лица (субъекта РФ и муниципальных образований);
 - законодательные и представительные органы власти (государственной власти и местного самоуправления);
 - исполнительные органы власти (государственной власти и муниципальных образований);
 - Центральный банк РФ;
 - органы финансового контроля (государственные и муниципальные);
 - органы управления государственными внебюджетными фондами;
 - главные распорядители (распорядители) бюджетных средств;
 - главные администраторы (администраторы) доходов бюджета;
 - главные администраторы (администраторы) источников финансирования дефицита бюджета;
 - получатели бюджетных средств
- и т.д.

Следующие сущности являются Объектами регионального бюджетного процесса:

- налоговые доходы (земельный налог, налог на имущество, налог на доходы физических лиц и т.д.);

- безвозмездные поступления (дотации, субсидии, субвенции и т.д.);
 - доходы от использования имущества;
 - штрафы (за нарушения законодательства);
 - бюджетные ассигнования (на оказание государственных или муниципальных услуг, на социальное обеспечение населения, на обслуживание государственного или муниципального долга и т.д.);
 - бюджетные кредиты (субъекту РФ, муниципальному образованию и т.д.);
 - объекты капитального строительства (здания, сооружения и т.д.);
 - объекты инфраструктуры (производственной, социальной, транспортной, инженерной и т.д.)
- и т.д.

В качестве Оснований регионального бюджетного процесса выступают:

- нормативно-правовые акты (законы, кодексы, постановления и т.д.);
 - договоры;
 - обязательства (органов государственной власти и местного самоуправления)
- и т.д.

Операциями являются:

- поправки в нормативно-правовые акты (заявки);
 - документы, подтверждающие возникновение денежных обязательств (акты выполненных работ, акты приёма-передачи и т.д.);
 - документы купли-продажи (накладные, кассовые ордера и т.д.)
- и т.д.

В модели КОСС все субъекты являются записями таблицы «Сущности» категории «Субъект» и типов «Губернатор», «Глава муниципального образования», «Министерство», «Агентство» и другие, приведенные выше. Каждый субъект бюджетного процесса может иметь свой набор свойств и состояний, например, муниципальные образования имеют свойства «Численность населения», «Площадь территории». Все объекты также являются записями таблицы «Сущности», но категории «Объект» и типов «Земельный налог», «Дотация», «Субсидия» и другие. Аналогично субъектам, каждый объект бюджетного процесса может иметь свой набор свойств и состояний, например, здания и сооружения имеют свойства «Площадь», «Стоимость». Все основания также являются записями таблицы «Сущности», но категории «Основание» и типов «Закон», «Кодекс», «Постановление» и другие. Аналогично субъектам и объектам, каждое основание может иметь свой набор свойств и состояний, например, закон имеет свойство «Дата вступления в силу».

Субъекты, объекты и основания могут образовывать иерархии, представляющие в модели КОСС записи таблицы «Связи» типа «Входит в», в которых ведущей сущностью является целым, а подчиненная – частью.

Операции модели КОСС, реализуемые в БД, рассмотрим на примере такого понятия предметной области как «Заявки на внесение изменений в закон о бюджете». Они представляются записями в

таблице «Документы» типа «Заявка». В случае, когда «Заявка» поступает от получателя бюджетных средств, то в поле «Поставщик» указывается «Министерство финансов», а в поле «Получатель», соответственно, – получатель бюджетных средств. Бюджетные ассигнования, указанные в рассматриваемой заявке, являются записью в таблице «Операции», в которой поле «Объект» содержит ссылку на сущность категории «Объект» типа «Бюджетное ассигнование», поля «КолПост», «КолПолуч», «ЕдИзмПост» и «ЕдИзмПолуч» содержат количество и единицу измерения ассигнований.

Сопоставив таким образом понятия предметной области «Открытый бюджет Калининградской области» с понятиями модели КОСС, не требуется вносить существенных изменений в структуру БД этой модели. Достаточно лишь наполнить некоторые таблицы («Категории», «ТипыСущностей», «ТипыСвязей», «ТипыДокументов» и другие) записями, необходимыми для заданной предметной области.

В качестве СУБД для реализации использовался Microsoft SQL Server 2014. Количество основных таблиц составляет 20, объём БД на данный момент 2,5 Гб, количество записей в таблицах «Сущности» – 130 тыс., «Связи» – 250 тыс., «Документы» – 145 тыс., «Операции» – 3,6 млн. Время представления запрашиваемой выходной информации для OLAP-кубов, содержащих до 20 тыс. записей, не превышает 5 секунд.

Заключение

Модель КОСС была протестирована при создании линейки программных комплексов государственного управления:

- Конфигурация ситуационного центра VSM Cenose WEB «Открытый бюджет» [13];
- Ситуационный центр «Электронный бюджет» [14];
- Универсальный виртуальный ситуационный центр «Муниципалитет» [15].

В результате проектирование базы данных было ускорено от 2 до 5 раз.

По данным Росстата в Российской Федерации по состоянию на начало 2017 года насчитывалось 22 327 муниципальных образований различного

уровня, св. 270 тысяч малых предприятий (численность сотрудников 16–100 человек), 20,6 тысяч – средних (101–250 человек), а всего средних и крупных предприятий и организаций почти 52 тысячи. В первую очередь средним и крупным предприятиям и организациям и 2600 муниципальным образованиям верхнего уровня потребуются ситуационные центры в качестве первого шага на пути создания «Умного города», «Умного муниципалитета», «Умного предприятия». Таким образом, возрастает потребность в ситуационных центрах для государственных структур. При этом ускорение проектирования и экономия ресурсов являются основными требованиями при проведении государственных закупок.

Выводы

Предлагаемая универсальная модель предметной области (КОСС) и её реализация в реляционной БД позволяют унифицировать структуру БД отдельного СЦ. Это, в свою очередь, делает возможным тиражирование СЦ, главным образом изменяя только содержимое таблиц БД, а также унификацию информационного взаимодействия между отдельными СЦ и объединение их в систему распределённых СЦ.

Использование модели КОСС при проектировании БД СЦ «Открытый бюджет Калининградской области» позволило повысить быстродействие системы за счёт простоты архитектуры БД. Основная трудоёмкость при разработке рассмотренного СЦ заключалась в организации импорта данных из других информационных систем, используемых в бюджетном процессе. Внесение изменений в функционирование СЦ заключается в корректировке контента таблиц БД, при этом изменения её структуры не требуется, что существенно упрощает модификацию.

Работа выполнена в рамках гранта «Развитие НТИ-II», договор номер: 151ГРНТИС5/35877 от 21.07.2017, тема «Распределённая интеллектуальная система управления прибрежными инфраструктурными объектами и территориями на основе технологий ситуационных центров».

Литература

1. Кострикова Н. А., Меркулов А. А., Яфасов А. Я. Технология синтеза распределённых интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов – Морские интеллектуальные технологии Т.1. №3 (37) 2017. С. 135-141.
2. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2005. 544 с.
3. Ноубл Дж. и др. Flex 4. Рецепты программирования. БХВ-Петербург, 2011. 706 с.
4. Lerman J., Miller R. Programming Entity Framework: Code First. O'Reilly Media 2012. 196 с.
5. Биряльцев Е.В., Минниханов Р.Н. Ситуационный центр главы региона Российской Федерации в парадигме цифровой экономики // Материалы V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры», Россия, Казань, 27-28 февраля 2018. Ч. II, С. 3-11.
6. Зацаринный А.А. Технологии ситуационного центра как облачные услуги // Материалы V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры», Россия, Казань, 27-28 февраля 2018. Ч. II, С. 24-31.
7. Когаловский М.П. Энциклопедия технологий баз данных. М.: Финансы и статистика, 2005. 800 с.
8. Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems, 2nd edition. McGraw-Hill Higher Education. 2000. 930 с.

9. Муса-Оглы Е. С., Бессарабов Н. В. Универсальные модели данных RSDN Magazine № 3. 2011. С. 51-55.
10. Микляев И. А. Универсальное приложение матричной универсальной объектно-реляционной базы данных // Материалы I Международной научно-практической конференции «Объектные системы – 2010», Россия, Ростов-на-Дону, 10-12 мая 2010г, С. 34-39.
11. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных, 8-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 1328 с.
12. Меркулов А.А., Дмитровский В.А., Майтаков Ф.Г. Модель данных «Категории операций, сущностей и связей» // Материалы V Международного балтийского морского форума 2017. С. 1632-1639.
13. Майтаков Ф. Г., Меркулов А. А., Петренко Е. В. и др. Конфигурация ситуационного центра VSM Cenose WEB «Открытый бюджет». М.: Роспатент св. № 2015612041. 2015.
14. Майтаков Ф. Г., Меркулов А. А., Петренко Е. В. и др. Ситуационный центр «Электронный бюджет». М.: Роспатент св. № 2015612058 2015.
15. Яфасов А. Я., Меркулов А. А., Петренко Е. В. и др. Универсальный виртуальный ситуационный центр «Муниципалитет». М.: Роспатент св. № 2013661281. 2013.

References

1. Kostrikova N. A., Merkulov A. A., Yafasov A. YA. Tekhnologiya sinteza raspredelennyh intellektual'nyh sistem upravleniya kak instrument ustojchivogo razvitiya territorij i slozhnyh ob"ektov. Morskije intellektual'nye tekhnologii T.1. №3 (37) 2017. Pp. 135-141.
2. Vendrov A.M. Proektirovanie programmogo obespecheniya ehkonomicheskikh informacionnyh sistem: Uchebnik. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Finansy i statistika, 2005. 544 p.
3. Noubi Dzh. i dr. Flex 4. Recepty programmirovaniya. BHV-Peterburg, 2011. 706 p.
4. Lerman J., Miller R. Programming Entity Framework: Code First. O'Reilly Media 2012. 196 p.
5. Biryal'cev E.V., Minnihanov R.N. Situacionnyj centr glavy regiona Rossijskoj Federacii v paradigme cifrovoj ehkonomiki. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennye problemy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: intellektual'nye transportnye sistemy i situacionnye centry», Rossiya, Kazan', 27-28 fevralya 2018. CH. II. Pp. 3-11.
6. Zacarinnij A.A. Tekhnologii situacionnogo centra kak oblachnye uslugi. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennye problemy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: intellektual'nye transportnye sistemy i situacionnye centry», Rossiya, Kazan', 27-28 fevralya 2018. CH. II. Pp. 24-31.
7. Kogalovskij M.R. EHnciklopediya tekhnologij baz dannyh. M.: Finansy i statistika, 2005. 800 p.
8. Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems, 2nd edition. McGraw-Hill Higher Education. 2000. 930 p.
9. Musa-Ogly E. S., Bessarabov N. V. Universal'nye modeli dannyh RSDN Magazine № 3. 2011. S. 51-55.
10. Miklyaev I. A. Universal'noe prilozhenie matrichnoj universal'noj ob"ektno-reljacionnoj bazy dannyh. Materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Ob"ektnye sistemy – 2010», Rossiya, Rostov-na-Donu, 10-12 maya 2010g. Pp. 34-39.
11. Dejт K. Dzh. Vvedenie v sistemy baz dannyh, 8-e izdanie: Per. s angl. M.: Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2005. 1328 p.
12. Merkulov A.A., Dmitrovskij V.A., Majtakov F.G. Model' dannyh «Kategorii operacij, sushchnostej i svyazej» Materialy V Mezhdunarodnogo baltijskogo morskogo foruma 2017. Pp. 1632-1639.
13. Majtakov F. G., Merkulov A. A., Petrenko E. V. i dr. Konfiguraciya situacionnogo centra VSM Cenose WEB «Otkrytyj byudzhет». M.: Rospatent sv. № 2015612041. 2015.
14. Majtakov F. G., Merkulov A. A., Petrenko E. V. i dr. Situacionnyj centr «EHlektronnyj byudzhет». M.: Rospatent sv. № 2015612058 2015.
15. Yafasov A. YA., Merkulov A. A., Petrenko E. V. i dr. Universal'nyj virtual'nyj situacionnyj centr «Municipalitet». M.: Rospatent sv. № 2013661281. 2013.

УДК 338.22

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПРОЕКТОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА В РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Альберт Гургенович Мнацакян

доктор экономических наук, профессор, директор Института отраслевой экономики и управления

Калининградский государственный технический университет

236000, Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: albert.mnatsakanyan@klgtu.ru

Оксана Геннадьевна Огий

кандидат социологических наук, доцент

Калининградский государственный технический университет

236000, Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru

Аннотация

Использование риск-менеджмента при реализации проектов государственно-частного партнерства (ГЧП) в отдельно взятой отрасли или сфере невозможно без учета их специфики. Поскольку ГЧП реализуется в основном программно-проектными способами, целесообразно рассматривать не модель оценки рисков организации (отрасли), а управление проектными рисками в качестве базового конструкта. Рыбохозяйственный комплекс не является исключением, разработка рекомендаций по оценке и управлению рисками ГЧП в нем должны быть основаны на функционале управления рисками проектов. При разработке проектов ГЧП важное значение обретает выявление, учет и оценка влияния внешних факторов. Целью статьи является разработка научного подхода к оценке и управлению рисками рыбохозяйственных проектов государственно-частного партнерства на основе модернизации использования существующих методов и инновационных моделей. В статье обобщаются научные взгляды и регламентирующие документы, позволяющие определить сформировавшиеся подходы к восприятию рисков, их достоинства и недостатки. Определено понятие «отраслевого риска» для рыбохозяйственного комплекса, цели и этапы процесса управления рисками рыбохозяйственных проектов ГЧП. Сформирована трехмерная модель процесса управления рисками, определена возможность использования для комплексной оценки влияния внешних факторов концепции «глобального систематизирующего рискованного потока», разработан подход к оценке внешних рисков проекта ГЧП в рыболовстве на базе синтеза моделей «рискованного потока» и «VUCA». Предложенные решения позволяют не только выбирать оптимальные варианты оценки и управления рисками ГЧП в рыбохозяйственном комплексе, но и делать обоснованные выводы об их эффективной реализации в отрасли.

Ключевые слова: управление риском, методика, государственно-частное партнерство, управление проектами, рыбохозяйственный комплекс.

RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP PROJECTS IN THE FISHERIES

Albert G. Mnatsakanyan

Doctor of Economy,

Professor, Director of the Institute of Industrial Economics and Management

Kaliningrad State Technical University

236000, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1

e-mail: albert.mnatsakanyan@klgtu.ru

Oksana G. Ogij

Ph.d. in social sciences

Associate Professor,

Kaliningrad State Technical University

236000, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1

e-mail: oksana.ogij@klgtu.ru

Abstract

The use of risk management in projects of public-private partnership (PPP) in a particular industry or field is impossible without taking into account their specificities. Because PPP is implemented mostly software-design methods, should be considered not a model risk assessment organization (industry), and managing project risks as the underlying construct. Fisheries complex is no exception, the development of recommendations on risk assessment and management of PPP it should be based on functional risk management projects. When developing PPP projects important finds identification, record keeping and evaluation of the impact of external factors. The aim of this paper is to develop a scientific approach to risk assessment and management of fisheries projects of public-private partnership on the basis of modernization of the use of existing methods and innovative models. The article summarizes the scientific views and governing documents to determine the approach emerged. For the first time defined the concept of "industry risk" for the fishery, objectives and stages of the risk management process management of PPP projects. Formed a three-dimensional model of the risk management process is defined for the integrated assessment of the impact of external factors, the concept of «global risk stream», developed an approach to assess external risks PPP project in fisheries on the basis of the synthesis models "flow risk" and "VUCA". Proposed solutions enable you not only to choose optimal variants of risk assessment and management of PPP in fisheries complex, but also to make informed conclusions about their effective implementation in the industry.

Key words: risk management, methodology, public-private partnership, project management, fisheries complex.

Введение

1. Несмотря на непрерывное развитие менеджмента риска в различных областях деятельности, вопросы оценки и управления рисками в рыбохозяйственном комплексе (РХК) остаются малоизученными. Следует отметить работы, А.П. Латкина, О.В. Григорьева, Suresh A Sethi, S. Kristiansen и др., посвященные методическим аспектам оценки риска отдельных объектов и сфер, которые вносят определенный вклад в исследования проблематики риск-менеджмента в рыбохозяйственном комплексе [5,7,8,17], также публикации Р.А. Мнацаканяна, А.И. Попова, С.П. Сазонова, Л.Р. Ахметовой, посвященные оценке рисков при реализации проектов государственно-частного партнерства [3, 11,12, 13].

Поскольку конкретная отрасль или сфера применения риск-менеджмента имеет свою специфику, в том числе и реализация проектов государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе, считаем первоначальной приоритетной задачей определение контекста управления рисками для: 1) хозяйственного комплекса; 2) государственно-частного партнерства. Учитывая специфику реализации государственно-частного партнерства целесообразно рассматривать в качестве базового конструкта не управление рисками организации (управление корпоративными рисками), а управление проектными рисками. Таким образом, дальнейшая разработка рекомендаций по оценке и управлению рисками государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе будет основываться на методологии управления рисками проектов.

Любая хозяйственная деятельность являясь видом экономической деятельности, относится к тем сферам, где риск во взаимоотношениях между субъектами присутствует всегда. Сегодня большинство специалистов по управлению рисками считает, что риски являются

обязательным атрибутом социально-экономических отношений, в том числе хозяйственных. В тоже время, они отмечают, что толкование сущности хозяйственных рисков «до сих пор оказывается дискуссионным» [1].

Подходы и методы

Обобщение современных научных работ и действующих регламентирующих документов (стандарты, нормативно-правовые-акты) позволяет определить несколько сформировавшихся подходов к восприятию риска.

1. *Риск как угроза, возможность потерь.* Этот подход предполагает понимание проектных рисков как предполагаемого ухудшения результирующих показателей проектной деятельности, возникающее под воздействием неопределенности. В этом контексте количественная оценка риска рассматривается как изменение численных показателей проекта: чистой приведенной стоимости (NPV), внутренней нормы доходности (IRR) и срока окупаемости (PB) [6].

Сторонники этого подхода связывают природу неопределенности, рисков и потерь, в первую очередь, с возможностью финансовых потерь вследствие прогнозного, вероятностного характера будущих денежных потоков и реализации вероятностных аспектов проекта и его многочисленных участников, ресурсов, внешних и внутренних обстоятельств [2].

Хозяйственный риск проявляется в возможности нежелательного развития событий и отклонения от преследуемой цели хозяйственной деятельности предприятия [4].

2. *Риск как влияние неопределенности на результат (достижение цели).* В практике управления проектами «неопределенность» играет ключевую процессуально-методологическую роль. Этот подход акцентирует функцию целеполагания и

рассматривает эффективность этого важнейшего процесса в практике управления проектами в зависимости от степени неопределенности.

Как правило, в качестве основных факторов неопределенности рассматриваются следующие:

- неполное владение всей необходимой фактологической информацией, включая отдельные параметры, характеристики проблемной ситуации, альтернативы для выбора оптимального решения, а также невозможностью учета всей даже доступной информации;

- вероятностный характер внешней ситуации, поведения внешней среды;

- эффект «случайного фактора», который выражается наличием параметров или элементов ситуации, которые являются непрогнозируемыми или их невозможно предсказать даже вероятно.

Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО 31000-2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» трактует риск как «влияние неопределенности на цели».

Хозяйственный риск в рассматриваемом подходе определяется как объективное свойство целенаправленной деятельности хозяйствующего субъекта, обусловленное объективными причинами: неполнотой информации о прошлом и настоящем, а также неопределенностью будущего.

3. *Риск как вероятность (в той или иной степени) и потеря, и приобретения.* С экономической точки зрения риск представляет собой событие, которое может произойти с некоторой вероятностью, при этом возможны три экономических результата: 1) отрицательный (ущерб, убыток, проигрыш); 2) положительный (выгода, прибыль, выигрыш); 3) нулевой (ни ущерба, ни выгоды) [15].

Project Management Body of Knowledge (PMBoK) - национальный американский стандарт по управлению проектами трактует риск проекта как «неопределенное событие или условие, которое в случае реализации, будет иметь отрицательное или положительное влияние на цели проекта (содержание, сроки, стоимость, качество)», а цель управления рисками проекта как «снижение вероятности и воздействия на цели проекта неблагоприятных событий и повышение вероятности и воздействия на цели проекта благоприятных событий».

Потребность в обеспечении наибольшей эффективности взаимодействия государства, экономики и бизнеса приводит к необходимости уточнения методических подходов к экономическому обоснованию проектов, реализуемых на принципах государственно-частного партнерства, с учетом специфики национальной экономики, выявления возможных рисков, методов их оценки и форм управления ими [3].

Государственно-частное партнерство как форма реализации проектов обладает

следующими важными характеристиками:

- в основе своей содержит распределение рисков, т.е. механизм разделения рисков (например, финансовых), между государственными (муниципальными) акторами и бизнес-акторами;

- возможность использовать регулятивные властные функции государства для обеспечения интересов инвестора.

Государственно-частное партнерство предоставляет государственному и частному секторам уникальную возможность распределить риски при реализации совместного проекта, обеспечивая взаимную дополнительную поддержку для того, чтобы гарантировать выгоды и преимущества от проекта для обеих сторон [13].

Отдельного внимания, с точки зрения управления рисками в рыбной отрасли, заслуживает реализация проектов государственно-частного партнерства в форме концессионного соглашения (концессионного проекта).

В концессионных проектах, в отличие от других форм партнерства государства и бизнеса, все риски перераспределяются между участниками проекта: концессионером, государством, инвесторами, акционерами, банками, страховыми компаниями и другими участниками. Каждый тип риска прописывается в концессионном договоре или специальном приложении к нему с последующей проработкой механизма контроля за остаточными рисками концессионера [12].

Использование риск-менеджмента при реализации рыбохозяйственных проектов государственно-частного партнерства позволит решить следующие принципиальные задачи:

- повышение вероятности достижения целей проекта;

- совершенствование управления проектом;

- комплаенс-контроль;

- повышение надежности прогнозов, планов и принимаемых решений;

- укрепление доверия всех участников проекта;

- повышение эффективности реализации общих и специальных функций управления проектом;

- формирование и развитие «отраслевой практики» оценки и управления рисками с созданием и пополнением «отраслевого реестра рисков».

- Процесс управления рисками рыбохозяйственных проектов ГЧП включает последовательные (этапные) действия и процедуры, а также сквозные задачи, реализация которых осуществляется на всех этапах и пронизывает весь процесс (рис. 1).

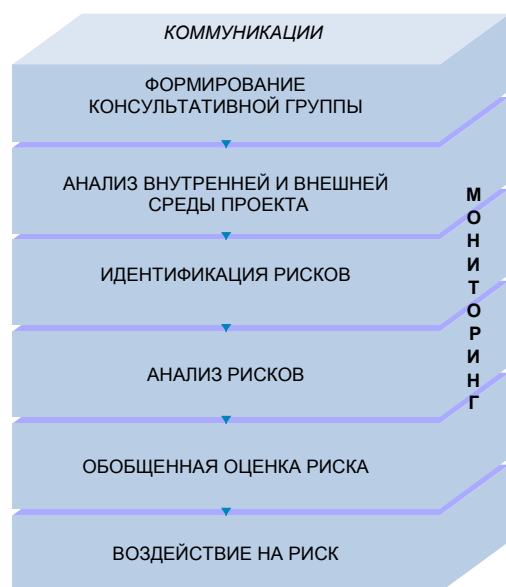


Рис. 1. Трёхмерная схема процесса управления рисками рыбохозяйственного проекта ГЧП

Внешняя среда проекта представляет собой комплекс факторов, которые не относятся непосредственно к содержанию проекта, проектному заданию или участникам проекта, но прямо или косвенно могут оказывать влияние на уровень неопределенности, характер и степень риска проекта. Поэтому на начальном этапе управления рисками проекта необходимым условием становится всесторонний учет и оценка влияния внешних факторов.

Концептуальной основой анализа макрофакторов может служить модель PEST, которая позволяет определить характер влияния социокультурных, политико-правовых, технологических, экономических факторов среды.

С точки зрения проектов государственно-частного партнерства принципиальной задачей становится оценка международного, национального, регионального или локального внешнего влияния на проект.

Поскольку, как отмечалось ранее, специфические характеристики и условия рыбохозяйственного комплекса должны быть включены в контекст проектного риск-менеджмента, актуальной научно-методической задачей становится определение отраслевого контекста рисков. Л.Н. Тэпман определяет отраслевой риск как «вероятность потерь в результате изменений в отрасли и степень этих изменений как внутри, так и по сравнению с другими отраслями» [14]. Таким образом, выделяется возможность существенного влияния внутриотраслевых факторов (условий) на проекты, реализуемые для нужд отрасли или предприятиями отрасли. Вместе с тем, отметим, что это влияние может приводить не только к

«потерям», но и создавать возможности для снижения рисков (например, в сравнении с аналогичными проектами в других отраслях).

В качестве рабочего определения отраслевого риска для проектов государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе можно использовать следующее - это неопределенное событие или условие, вызванное деятельностью отраслевого регулятора (Росрыболовства), организаций (учреждений, предприятий) рыбохозяйственного кластера, или совокупным результатом этой деятельности, а также изменением состояния сырьевой базы рыболовства и рыбоводства, которое в случае реализации, будет иметь отрицательное или положительное влияние на цели проекта.

Особое внимание в этом определении сосредоточено на состоянии сырьевой базы рыболовства, с которым связаны риски добычи, сохранения и воспроизводства биоресурсов. Специфическим свойством рыболовства в этом контексте выступает высокая степень неопределенности и сложность прогнозирования поведения объектов промысла при их огромном видовом разнообразии. Влияние рыболовной морехозяйственной деятельности также требует анализа не только с позиции изъятия и восполнения ресурсов, но и с позиции загрязнения, т.е. экологических рисков.

Результаты

Для комплексной оценки внешней среды проекта можно использовать один из эффективных способов управления рисками - глобальный систематизирующий рискованный поток, который определяется исследователями, использующими эту модель [10,13], как совокупность системообразующих факторов, включающих в себя элементы, образующие системы учета риска, и состоящих из причин, видов и последствий риска, которые возникают в зависимости от экономической системы (рис. 2). В свою очередь, отдельные рискованные потоки представляет собой совокупность последовательно возникающих факторов, состоящих из причин возникновения риска, самого риска и его последствий.

Оценка на уровне мегасистемы предполагает анализ правовых, экономических, политических тенденций в мировом рыболовстве. Влияние макросистемы должно оцениваться на уровне национальных (российских) социально-экономических тенденций, политических процессов, практик государственного администрирования. На уровне мезосистемы оцениваются отраслевые риски рыболовства и рыбоводства, т.е. комплексно анализируется рыбохозяйственный комплекс, включая специфические территориальные (например, бассейновые или региональные) риски.

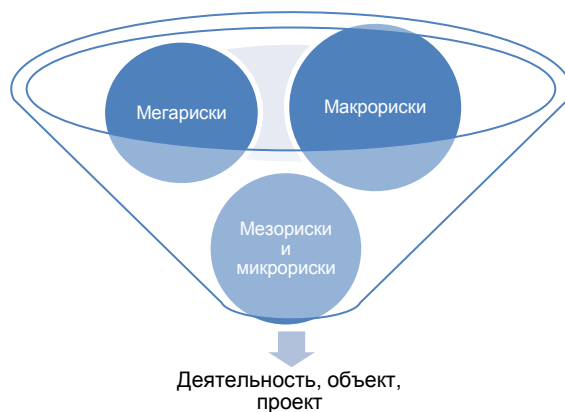


Рис. 2. Глобальный систематизирующий рисковый поток

С целью адаптации этого подхода к задачам оценки внешнего контекста рисков рыбохозяйственных проектов государственно-частного партнерства на данном этапе (оценка внешней среды) в составе потока микроуровень не рассматривается. Для оценки внешних рисков предпочтительно использование качественных методов, поскольку дать надежную количественную оценку совокупности (потоку) внешних воздействий весьма затруднительно. Целесообразно использовать экспертную оценку. Структуризацию и описание рискового влияния внешней среды проекта наиболее полно и информативно можно провести с использованием модели VUCA:

- **volatility** (волатильность) – определяет изменчивость, нестабильность и нелинейность внешней среды;
- **uncertainty** (неопределённость) – рассматривается как недостаток информации и невозможность прогнозирования будущих изменений на основании имеющихся знаний, в том числе опыта прошлого;
- **complexity** (сложность) – внешняя среда может быть представлена огромным количеством постоянно меняющихся взаимосвязей

(взаимовлияний), что затрудняет предвидение того или иного действия;

- **ambiguity** (неясность) – предполагает возможность двусмысленной трактовки, поскольку ключевые характеристики ситуации не определены однозначно, таким образом трактовка определяет предполагаемый сценарий или прогноз.

Универсальность и в тоже время, возможность параметризации, позволяют использовать элементы VUCA в качестве критериев оценки индивидуальных рисковых потоков внутри глобального потока. Результаты этого оценивания в дальнейшем станут основой управления на этапе воздействия на риск с использованием модели VUCA-Prime, разработанной футурологом Бобом Йохансенем (Институт будущего, США) [16].

Интеграция положений глобального систематизированного рискового потока (адаптированный вариант) и критериев VUCA позволяет получить весьма продуктивную модель для оценки рисков внешней среды рыбохозяйственных проектов государственно-частного партнерства (рис. 3).

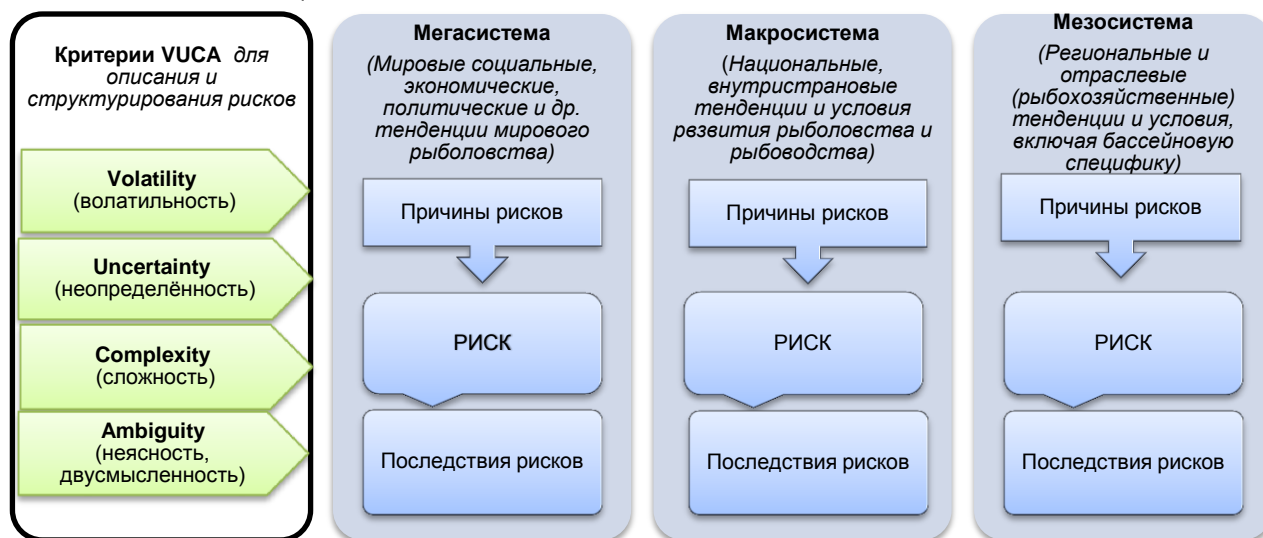


Рис. 3. Подход к оценке внешней среды проекта ГЧП в РХК на основе моделей «рискового потока» и «VUCA»

При количественном анализе экономической целесообразности проекта и финансовых рисков, после идентификации всех материальных и нематериальных затрат и выгод определяют их стоимость в денежном выражении (включая нематериальные затраты и выгоды). Существуют различные стандартные методы расчета их стоимости, основанные на таких способах расчета, как «готовность заплатить» и «использование заместителей». Если, как часто случается, затраты понесены за короткий промежуток времени (например, год), а выгоды могут быть получены в долгосрочный период времени, то обычно для оценки и сравнения выгод необходимо привести их к «единому моменту времени». Все затраты и выгоды представляют в виде приведенной стоимости. Для нахождения общей чистой приведенной стоимости (NPV) объединяют все затраты и выгоды всех причастных сторон. Положительное значение NPVproject подразумевает, что действие выгодно.

Для определения стоимостной меры риска рекомендуем использовать показатель Value at risk (VaR) - это выраженная в денежных единицах оценка величины, которую не превысят ожидаемые в течение данного периода времени потери с заданной вероятностью.

Наиболее простой путь определения VaR проекта состоит в осуществлении ряда шагов.

Сделать необходимые допущения и рассчитать эффективность проекта не по одному, а по трем или пяти сценариям развития событий (например, оптимистическому, умеренно оптимистическому, наиболее вероятному, умеренно пессимистическому и пессимистическому). Каждому Y-му сценарию экспертно присвоить вероятность его осуществления P. Сумма вероятностей по всем сценариям равна единице. Рассчитать ожидаемую чистую приведенную ценность проекта E(NPV):

$$E(NPV) = \sum P_j \times NPV_j, \quad (1)$$

где NPV_j – чистая приведенная ценность для j-го сценария.

Оценить абсолютное стандартное отклонение NPV:

$$\sigma(NPV) = \sqrt{\left[\sum P_j \times (NPV_j - E(NPV))^2 \right]}. \quad (2)$$

Найти индивидуальную VaR проекта, используя следующую формулу:

$$VaR = -[E(NPV) + k_\alpha \times \sigma(NPV)], \quad (3)$$

где k_α – параметр стандартного нормального распределения, зависящий от заданной доверительной вероятности. Индивидуальную

VaR проекта можно применять только в том случае, если проект экономически обособлен [9].

Для сравнения общих ожидаемых затрат с общими ожидаемыми выгодами (доходами и преимуществами) проектов и выбора лучшего или наиболее выгодного варианта решения рекомендуем провести анализ эффективности затрат (анализ «затрат и выгод»). Данный метод является неявной частью многих систем оценки риска.

Количественный анализ эффективности затрат включает в себя все суммарные затраты и доходы всех причастных сторон в денежном выражении, которые попадают в область применения анализа и приведены за периоды времени, в которые накапливаются затраты и доходы. Входными данными для принятия решений о риске является полученная чистая приведенная стоимость (NPV). Положительное значение NPV обычно значит, что событие должно произойти. Однако в отдельных случаях для отрицательного риска, особенно включающего риск для жизни человека или значительный вред окружающей среде, может быть применен принцип ALARP.

Множество методов управления риском можно объединить в несколько групп возможного воздействия на риск:

- компенсацию рисков, включающую инструментальный анализ внешней среды, маркетинг проектов, комплаенс-контроль, резервирование;
- распределение рисков, включающее разделение рисков по временным лагам и (или) между участниками проекта;
- уклонение (уход) от рисков, включающее отказ от рискованных проектов, страхование рисков, вовлечение гарантов.
- локализацию рисков, используется в многопроектных системах с высокорисковыми проектами.

Эти методы применимы, как по отдельности в отношении каждого конкретного риска, так и комплексно. Вместе с тем, залогом эффективной реализации проектов государственно-частного партнерства должен стать стратегически ориентированный подход воздействия на риск, которому должны быть привержены все заинтересованные стороны проекта. Такой подход на наш взгляд, можно реализовать на основе усовершенствованной модели VUCA-Prime (рис. 4), тем более, что базовую модель VUCA мы рекомендуем к использованию на этапе анализа воздействия внешней на неопределенность и риск проекта.



Рис. 4. Управление рисками на основе модели VUCA-Prime

Видение (Vision) используется как инструмент противодействия «волатильности». Концентрация на целях проекта обеспечит адекватное реагирование на риски, чтобы параметры проекта не выходил из-под контроля.

Понимание (Understanding) как инструмент снижения неопределенности, предполагает ориентацию на получение дополнительных знаний (информации), использование исследований, экспериментов для более полного и однозначного понимания контекста, ситуации, внешней и внутренней среды проекта.

Ясность (Clarity) противостоит «сложности» и направлено на избавление от ненужных, фрагментирующих деталей с акцентом на ключевые элементы ситуации. Главным инструментом здесь выступает упрощение.

Гибкость (Agility) позволяет преодолеть неоднозначность, используя возможности быстрого реагирования на меняющиеся обстоятельства. Инструментом выступает проработка широкого набора потенциальных стратегий реагирования, что позволит принимать эффективные координирующие действия и тем самым снижать риск.

Выводы

Представленные рекомендации по оценке и управлению рисками государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе основываются на ряде установок и положений, полученным нами в ходе исследования и заключаются в следующем.

Не существует экономического поведения свободного от риска. Неопределенность и риск – это неотъемлемая часть реализации

рыбохозяйственных проектов на условиях государственно-частного партнерства. Следовательно, управление рисками должно быть подсистемой системы управления проектами в рыбохозяйственном комплексе и обыденной практикой при их разработке и реализации.

Целесообразно рассматривать понятие «отраслевой риск» для проектов государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе, определение которого нами предложено в статье.

Для эффективного управления рисками недостаточно только оценки и управления внутренними ресурсами проекта, необходимо всесторонняя оценка внешнего влияния, включая комплаенс-риски.

Продуктивным подходом для оценки рисков внешней среды рыбохозяйственных проектов государственно-частного партнерства может стать модель на основе интеграции положений глобального систематизированного рискованного потока (адаптированный вариант) и модели VUCA.

Использование основных положений предложенной методики оценки рисков позволит сформировать и развивать «отраслевую практику» оценки и управления рисками с созданием и пополнением «отраслевого реестра рисков».

Необходимо продолжить дальнейшее исследование проблемы управления проектными рисками в рыболовстве и рыбоводстве с целью разработки формального аппарата оценки рисков с перспективой создания отраслевого стандарта.

Литература

1. Авдийский В.И., Безденежных В. М. Теория и практика управления рисками организации. Изд-во «КноРус», 2018 - 430 с.
2. Архипенков С. Лекции по управлению программными проектами. М. 2009 г. 127 с. URL: https://ita.sibsutis.ru/sites/csc.sibsutis.ru/files/courses/trpo/sw_project_management.pdf (Дата обращения: 17.09.2018)
3. Ахметова Л.Р., Ахметов И.В., Гавриленко И.Г. Некоторые подходы к оценке рисков в государственно-частном партнерстве// Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия экономика. № 1 (23). 2018. С. 74-81
4. Вишняков Я. Д. Общая теория рисков: учеб. пособие /Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. Москва: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.

5. Григорьев О. В., Бондарева И. О., Латыпова Э. А. Стратегическое управление грузовым портом на основе оценки рисков// Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. № 1. 2015. С.90-97
6. Дубинин Е. Анализ рисков инвестиционных проектов // Финансовый директор URL: https://www.cfin.ru/finanalysis/invrisk/inv_risk.shtml (Дата обращения: 12.11.2018)
7. Латкин А.П. Управление предприятиями морехозяйственной специализации: монография. Владивосток: Дальнаука, 2009. 368 с
8. Suresh A Sethi. Risk management for fisheries. School of Aquatic and Fishery Sciences, University of Washington, 1122 NE Boat St., Seattle, WA 98105, USA F I SH and F I SHERI E S , 2010, 11, 341–365.
9. Лимитовский М. А., Минасян В. Б. Анализ рисков инвестиционного проекта // Управление финансовыми рисками. № 2. 2011. С. 132-150
10. Махонина У. С. Рисковый поток как неотъемлемая часть инвестиционной деятельности предприятия // Аудит и финансовый анализ. 2013. № 5. С. 207.
11. Мнацаканян Р.А. Становление и развитие государственно-частного партнерства // Балтийский экономический журнал. № 26 (212), 2014. С. 37-44
12. Попов А.И. Концессионные риски в государственно-частном партнерстве// Финансы и кредит. № 19 (259), 2007. С. 34-43
13. Сазонов С.П., Мордвинцев А.И., Махонина У.С. Повышение эффективности управления рисками в государственно-частном партнерстве при реализации проектов социального инвестирования //Региональная экономика: теория и практика. № 2 (14), 2015. С. 91-98
14. Тэпман Л.Н. Риски в экономике. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. С. 54
15. Управление инновационными проектами / И. Л. Туккель, А. В. Сурина, Н. Б. Култин/ Под ред. И.Л. Туккеля. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
16. Johansen B. Leaders Make the Future: Ten New Leadership Skills for an Uncertain World. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 2009. 196 с.
17. Kristiansen S. Maritime transportation: Safety management and risk analysis / S. Kristiansen // Elsevier. 2010. 528 p.

References

1. Avdiyskiy V.I., Bezdenezhnykh V. M. Teoriya i praktika upravleniya riskami organizatsii. Izd. «KnoRus», 2018. 430 p.
2. Arkhipenkov S. Lektsii po upravleniyu programmnyimi proyektami. M. 2009. 127 p.
3. Akhmetova L.R., Akhmetov I.V., Gavrilenko I.G. Nekotoryye podkhody k otsenke riskov v gosudarstvenno-chastnom partnerstve. Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovaniye, ekonomika. Seriya ekonomika. № 1 (23). 2018. Pp. 74-81.
4. Vishnyakov YA. D. Obschchaya teoriya riskov: ucheb. Posobiye.YA. D. Vishnyakov, N. N. Radayev. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2007. 368 p.
5. Grigor'yev O. V., Bondareva I. O., Latypova E. A. Strategicheskoye upravleniye gruzovym portom na osnove otsenki riskov. Vestnik AGTU. Ser. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. № 1. 2015. Pp.90-97
6. Dubinin Ye. Analiz riskov investitsionnykh proyektov. Finansovyy direktor URL: https://www.cfin.ru/finanalysis/invrisk/inv_risk.shtml (Data obrashcheniya: 12.11.2018).
7. Latkin A.P. Upravleniye predpriyatiyami morekhozyaystvennoy spetsializatsii: monografiya. Vladivostok: Dal'nauka, 2009. 368 p.
8. Suresh A Sethi. Risk management for fisheries. School of Aquatic and Fishery Sciences, University of Washington, 1122 NE Boat St., Seattle, WA 98105, USA F I SH and F I SHERI E S , 2010, 11. Pp. 341–365.
9. Limitovskiy M. A., Minasyan V. B. Analiz riskov investitsionnogo proyekta.Upravleniye finansovymi riskami. № 2. 2011. Pp. 132-150.
10. Makhonina U. S. Riskovyy potok kak neot'yemlemaya chast' investitsionnoy deyatel'nosti predpriyatiya. Audit i finansovyy analiz. 2013. № 5. 207 p.
11. Mnatsakanyan R.A. Stanovleniye i razvitiye gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Baltiyskiy ekonomicheskyy zhurnal. № 26 (212), 2014. Pp. 37-44
12. Popov A.I. Kontsessionnyye riski v gosudarstvenno-chastnom partnerstve. Finansy i kredit. № 19 (259), 2007. Pp. 34-43
13. Sazonov S.P., Mordvintsev A.I., Makhonina U.S. Povysheniye effektivnosti upravleniya riskami v gosudarstvenno-chastnom partnerstve pri realizatsii proyektov sotsial'nogo investirovaniya. Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika № 2 (14), 2015. Pp. 91-98.
14. Tepman L.N. Riski v ekonomike. M.: YUNITI-DANA, 2002. 54 p.
15. Upravleniye innovatsionnymi proyektami. I. L. Tukkel', A. V. Surina, N. B. Kul'tin. Pod red. I.L. Tukkel'. SPb: BKHV-Peterburg, 2011. 416 p.
16. Johansen B. Leaders Make the Future: Ten New Leadership Skills for an Uncertain World. San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 2009. 196 p.
17. Kristiansen S. Maritime transportation: Safety management and risk analysis. S. Kristiansen. Elsevier. 2010. 528 p.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 517.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЛОВА РЫБНОЙ ПОПУЛЯЦИИ**Светлана Михайловна Алексеева**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alekseeva-sm@mail.ru

Алексей Иванович Руденко

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alex-rudenko@bk.ru

Аннотация

Решается задача отыскания оптимального режима облова рыбного стада, обеспечивающего максимальный улов в течение заданного периода времени.

Построен вариант, в котором задача максимизации соответствующего функционала, выражающего величину улова, значительно упрощается, если предположить, что до некоторого момента времени отлов не производится, а затем включается максимальный отлов. Тогда задача оптимального управления сводится к задаче на экстремум функции и нахождении такого момента времени начала лова, при котором достигается максимальный улов для данного промежутка времени.

Исследуются оптимальные режимы лова в течение заданного промежутка времени и с учетом периодического пополнения популяции, а также управляющие режимы, ориентирующие на максимальное сохранение популяции рыб. Численные эксперименты для модельных задач реализованы в среде Mathcad.

Рассмотренные модельные примеры показывают, что задача оптимизации управления рыбной популяцией может быть успешно решена как в случае искусственного разведения популяции, так и в естественных условиях при незначительных изменениях в математической модели.

Ключевые слова: Оптимальное управление, функционал, принцип максимума Понтрягина, промысловая смертность, промысловая мощность, модели динамики развития популяции, задача Коши, ППП Mathcad, моделирование.

MODELING OF OPTIMUM FISHING POPULATION**Svetlana M. Alekseeva**

Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Department of higher mathematics,
Kaliningrad State Technical University (KSTU)
236022, Kaliningrad, Sovietsky prospect, 1
e-mail: : alekseeva-sm@mail.ru

Alexey I. Rudenko

Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Department of higher mathematics,
Kaliningrad State Technical University (KSTU)
236022, Kaliningrad, Sovietsky prospect, 1
e-mail: alex-rudenko@bk.ru

Abstract

The problem of finding the optimum mode of a fishing herd providing the maximum harvest during a given period of time is solved.

The option in which the problem of maximizing the corresponding functional of expressing harvest size is considerably simplified if to assume that before a certain point in time harvest is not recorded, subsequently, the maximum harvest is established. Then the problem of optimum control narrows

down to a turning point function and finding such a point at the beginning of fishing by which the maximum yield for a given period is reached.

The optimum modes of fishing during a given period and taking into account periodic replenishment of population as well as the operating modes based on the maximum preservation of population of fishes are investigated. The numerical experiments are carried out with use of a mathematical application, Mathcad.

The reviewed model examples show that the problem of optimization of management of fish population can be successfully solved as in case of artificial cultivation of population, and under natural conditions at minor changes in mathematical model.

Key words: Optimal control, functional, Pontryagin's maximum principle, fishing mortality, fishing capacity, dynamics populations model, Cauchy problem, packaged applications Mathcad, modelling.

Введение

Пусть имеется закрытый водоем, в который запускается стадо мальков рыбы определенного вида и с заданной численностью.

Поставим задачу найти оптимальный режим отлова рыбы в течение заданного периода времени, при котором получим наибольшую биомассу улова, считая известными закон изменения веса особи в зависимости от времени и закон изменения численности популяции, обусловленный как естественной убылью, так и убылью численности за счёт облова стада [1].

Из «физических» соображений ясно, что не следует начинать вылов до тех пор, пока средний вес особи не достигнет некоторой (оптимальной) величины. С другой стороны если отодвинуть момент начала лова к концу заданного периода времени, то может оказаться недостаточно промыслового времени для лова.

В статье исследуются оптимальные режимы лова в течение одного года и двух лет с учетом пополнения популяции в начале второго года, а значит, с учетом периодического пополнения популяции. Также рассмотрены управляющие режимы, ориентирующие на максимальное сохранение популяции рыб. Алгоритмы решения поставленных задач составлены и реализованы с помощью пакета прикладных программ Mathcad.

1. Задача оптимального управления

Пусть $N(t)$ – численность стада в момент времени t , N_0 – начальная численность мальков. Рассматривая простейшую математическую модель динамики развития стада рыб, в которой предполагается, что скорость изменения численности популяции пропорциональна самой численности, имеем задачу Коши:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -(M + F(t))N(t) \tag{1}$$

$$N(0) = N_0 \tag{2}$$

где M - коэффициент естественной смертности, $F(t)$ - переменный коэффициент промысловой смертности.

Решение задачи Коши (1) – (2), имеет вид

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\left(M \cdot t + \int_0^t F(t) dt\right)} \tag{3}$$

где $N(t)$ – это численность популяции к моменту времени t .

Улов в весовом выражении к тому же моменту

времени определится формулой

$$P(t) = N_0 \cdot \int_0^t W(t) \cdot e^{-\left(M \cdot t + \int_0^t F(t) dt\right)} \cdot F(t) dt, \tag{4}$$

где функция $F(t)$ в (4) определяется заданным режимом лова, полностью зависит от промысловой мощности и может рассматриваться как «управление». Таким образом, задача выбора оптимального режима лова является задачей оптимального управления: среди всевозможных функций, удовлетворяющих условию

$$0 \leq F(t) \leq F_{\max} \tag{5}$$

найти такую функцию, для которой величина улова за время T в весовом выражении, определяемая функционалом

$$P(F) = P(T) = \int_0^T N(t)W(t)F(t)dt \tag{6}$$

окажется максимальной.

Одним из методов решения поставленной задачи управления является метод максимума Понтрягина. Мы значительно упростим эту задачу, если предположим, что до момента времени τ отлов не производится, а начиная с этого момента, включается максимальный отлов. Тогда функция $F(t)$ является кусочно-постоянной и имеет вид

$$F(t) = \begin{cases} F_{\max}, & t > \tau, \\ 0, & 0 < t \leq \tau \end{cases} \tag{7}$$

где F_{\max} – максимально возможное значение коэффициента промысловой смертности.

С учетом (7) функционал (6) принимает вид:

$$P(T, \tau) = N_0 \cdot F_{\max} \cdot \int_{\tau}^T W(t) \cdot e^{-\left(M \cdot t + \int_{\tau}^t F_{\max} dt\right)} dt \tag{8}$$

Таким образом, выражение улова $P(T, \tau)$ в течение заданного периода T при сделанных предположениях становится функцией одной переменной, и задача нахождения оптимального управления сводится к задаче на экстремум функции, определенной равенством (8). Эта задача состоит в нахождении такого момента времени τ (начала лова), при котором достигается максимальный улов для данного промежутка времени T .

Рассмотрим численные эксперименты нахождения оптимальных режимов лова для

модельных задач, реализованные в пакете прикладных программ Mathcad.

2. Оптимальное управление ловом в течение одного года

Улов в течение одного года (T=1) выражается формулой

$$P(1, \tau) = N_0 \cdot F_{\max} \cdot \int_{\tau}^1 W(t) \cdot e^{-(M \cdot t + F_{\max} \cdot (1-\tau))} dt \quad (9)$$

Будем считать, что вес особи меняется с течением времени линейно:

$$W(t) = W_0 + at \quad (10)$$

где W_0 – средний вес малька.

Воспользуемся математическим приложением Mathcad.

Пусть $N_0 := 100000$ - число мальков, запущенных в водоем, $W_0 := 0.05$ - средний вес малька (кг),

$N_0 \cdot W_0 = 5 \times 10^3$ - общий вес запущенных мальков (кг), $a := 0.95$, $W(t) := W_0 + at$ - закон изменения веса особи, $W(1) := 1$. $M := 1.2$, $F_{\max} := 2.5$ - коэффициенты естественной и промысловой смертности. В соответствии с формулой (9)

$$P(\tau) := N_0 \cdot F_{\max} \cdot \int_{\tau}^1 W(t) \cdot e^{-(M \cdot t + F_{\max} \cdot (1-\tau))} dt.$$

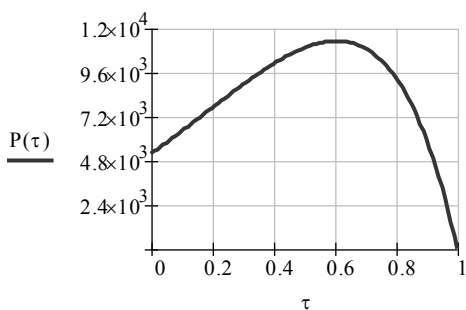


Рис. 1. Выражение улова $P(1, \tau)$ в течение года

Из графика этой функции, следует, что существует такой момент времени τ , при котором достигается максимальный улов для первого года. Используя встроенную функцию *given-find* пакета Mathcad, решаем задачу на экстремум функции $P(\tau)$, находя оптимальное время начала лова и максимальный улов:

$$\begin{aligned} \tau &:= 0.6 \\ \text{Given} \\ P'(\tau) &= 0 \\ \tau &:= \text{Find}(\tau) \quad \tau = 0.6064 \\ P(\tau) &= 1.131 \times 10^4 \end{aligned}$$

Таким образом, оптимальное время начала

лова равно $\tau = 0.6064$, этому времени отвечает максимальный улов $P(\tau) = 1.131 \times 10^4$ (кг).

Принимая число дней в году равным 365, находим $365 \cdot \tau = 221.348$ и $365 - 221 = 144$. Это означает, что лов следует начать на 222-й день и продолжать в течение 144 дней.

Если рассмотреть данный модельный пример отыскания оптимального режима лова в течение года, когда закон изменения веса особи, например $W(t) = W_0 + a\sqrt{t}$, то оптимальное время начала лова $\tau = 0.5516$, этому времени отвечает максимальный улов $P(\tau) = 1.083 \times 10^4$ (кг). Значит, в этом случае $365 \cdot \tau = 201.334$, $365 - 201 = 164$ и лов следует начинать на 202-й день, то есть на 20 дней раньше по сравнению с предыдущим случаем, и продолжать в течение 164 дней.

3. Оптимальное управление ловом в течение двух лет

Поставим задачу оптимального управления ловом в течение двух лет. Очевидно, к моменту времени t численность популяции составит:

$$N1(t, \tau) := N_0 \cdot e^{-M \cdot t - F_{\max} \cdot (t-\tau)}$$

особей. Тогда к началу второго года численность популяции без учета нового пополнения составит $N1(1, \tau) = 1.126 \times 10^4$ особей, при этом средний вес особи будет равен $W(1) = 1$ (кг), и общая биомасса будет равна $N1(1, \tau) \cdot W(1) = 1.126 \times 10^4$ (кг).

Предположим, что в начале второго промыслового года вновь запускается $N_0 = 1 \times 10^5$ мальков и средний вес малька составляет $W_0 = 0.05$ (кг). Общая биомасса пополнения будет такой же, как и в начале первого года, то есть $N_0 \cdot W_0 = 5 \times 10^3$ (кг). Закон изменения среднего веса особи в течение второго года определяется функцией $W1(t) := W(1+t)$.

Пусть τ_1, τ_2 – моменты начала лова в первый год и во второй год соответственно. Тогда доля в общей массе улова за два года особей, имеющих возраст более одного года, будет равна:

$$P_1(\tau_1, \tau_2) := N1(1, \tau_1) \cdot F_{\max} \cdot \int_{\tau_2}^1 W1(t) \cdot e^{-(M \cdot t + F_{\max} \cdot (1-\tau_2))} dt$$

Доля в общей массе улова особей, имеющих возраст менее одного года, будет равна за первый и второй год соответственно $P(\tau_1)$ и $P(\tau_2)$. Тогда суммарный улов за два года окажется равным:

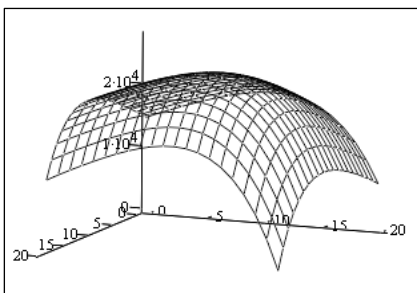
$$G(\tau_1, \tau_2) := P(\tau_1) + P(\tau_2) + P_1(\tau_1, \tau_2).$$

Построим график функции $G(\tau_1, \tau_2)$, для чего построим сетку значений независимых переменных, полагая

$$i := 0..20 \quad j := 0..20 \quad \tau_{1i} := i \cdot 0.05 \quad \tau_{2j} := j \cdot 0.05$$

и вводя матрицу D: $D_{i,j} := G(\tau_{1i}, \tau_{2j})$.

Поверхность функции $G(\tau_1, \tau_2)$ имеет вид:



D

Рис. 2. Суммарный улов за два года

График функции $G(\tau_1, \tau_2)$ показывает, что она имеет максимум, который найдем, приравняв частные производные по переменным τ_1 и τ_2 к нулю:

$$\begin{aligned} &\tau_1 := 0.6 \quad \tau_2 := 0.6 \\ &\text{Given} \\ &G'_{\tau_1}(\tau_1, \tau_2) = 0 \quad G'_{\tau_2}(\tau_1, \tau_2) = 0 \\ &\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(\tau_1, \tau_2) \\ &\tau_1 = 0.696 \quad \tau_2 = 0.593 \end{aligned}$$

Максимальный суммарный улов за два года равен $G(\tau_1, \tau_2) = 2.574 \times 10^4$ (кг). Улов за первый год составляет $P(\tau_1) = 1.094 \times 10^4$ (кг), а за второй год - $P(\tau_2) + P_1(\tau_1, \tau_2) = 1.48 \times 10^4$ (кг), причем доля рыб старше года равна $P_1(\tau_1, \tau_2) = 3.506 \times 10^3$ (кг), что в общем улове составляет $\frac{P_1(\tau_1, \tau_2)}{G(\tau_1, \tau_2)} \cdot 100 = 13.62\%$.

В первый год лов следует начинать на 255-й день с начала года ($\tau_1 \cdot 365 = 254.181$) и проводить его в течение 110 дней. Во второй год начало лова определяется 217-м днем с начала второго года ($\tau_2 \cdot 365 = 216.541$) и за второй год время лова будет равно 148 дням. Максимальный суммарный улов за два года равен $G(\tau_1, \tau_2) = 2.574 \times 10^4$ (кг).

4. Оптимальное управление ловом с учетом сохранения популяции

Далее поставим задачу поиска таких «управляющих» режимов, которые, с одной стороны, оптимизируют улов, а с другой стороны, ориентируют на сохранение данной популяции рыб. Как отмечалось, закон изменения веса

особи существенно влияет на решение поставленной оптимизационной задачи. Численный эксперимент в среде Mathcad проведен для некоторых степенных функций роста $\sqrt[3]{t}$, \sqrt{t} , t , t^2 . Например, в первом случае, $W_1(t) = W_0 + a\sqrt[3]{t}$, искомые функции $P(\tau)$, $N(\tau)$, где τ - время начала лова максимального улова, аппроксимированы параболическими сплайнами с помощью соответствующей встроенной в Mathcad функции и построены их графики:

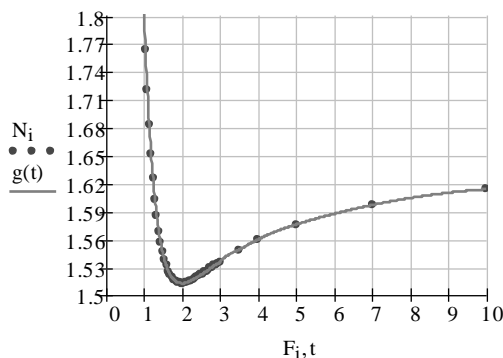


Рис. 3. Кривая численности популяции рыб

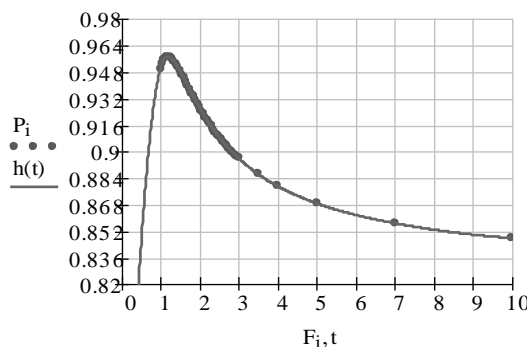


Рис. 4. Кривая максимального улова

Здесь $N_0 := 100000$, $W_0 := 0.05$, $N_0 \cdot W_0 = 5 \cdot 10^3$

$$F := \begin{pmatrix} 1 \\ 1.05 \\ 1.1 \\ \dots \\ 10 \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} 0.9493 \\ 0.9529 \\ 0.9552 \\ \dots \\ 0.8473 \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} 1.813 \\ 1.763 \\ 1.72 \\ \dots \\ 1.613 \end{pmatrix}, \quad (n=50)$$

$$g(t) := \text{interp}(\text{pspline}(F, N), F, N, t),$$

$$h(t) := \text{interp}(\text{pspline}(F, P), F, P, t).$$

Как видно из графика, существует минимум у функции $N(\tau)$. Поэтому, если начать лов рыбы на 170-й день с мощностью, обеспечивающей максимальный улов, то это заметно уменьшит численность популяции к началу второго года.

Требуемое сохранение популяции можно

обеспечить заданным увеличением промысловой мощности или более поздним началом лова. Если же вес особи изменяется по линейному закону, построенная функция $N(\tau)$ локального минимума не имеет, поэтому, если придерживаться режима лова, требуемое сохранение популяции обеспечивается заданным уменьшением промысловой мощности или более ранним началом лова. В то же время по графикам можно сделать вывод, что лов можно начинать позже, на зрелой стадии роста рыб, так как в этом случае рассматриваемая система более стабильна, и изменения реализуемой мощности не сильно влияют на изменение улова и численности рыб.

Заключение

В статье проведено исследование оптимальных режимов облова рыбного стада, обеспечивающего максимальный улов в весовом выражении в течение одного и двух лет с учетом пополнения популяции в начале второго года.

Отметим, что оптимальное управление ловом в случае одного и двух лет существенно

различаются. Очевидно, в случае трех и более лет, принципы получения оптимального управления не изменятся.

Также рассмотрены управляющие режимы, ориентирующие на максимальное сохранение популяции рыб.

Численные эксперименты нахождения оптимальных режимов лова для модельных задач реализованы в пакете прикладных программ Mathcad.

Рассмотренные модельные примеры показывают, что задача оптимизации управления рыбной популяцией может быть успешно решена как в случае искусственного разведения популяции, так и в естественных условиях при незначительных изменениях в математической модели.

Отметим, что свой вклад в исследование задачи об оптимальном лове рыбной популяции внесли студенты КГТУ Павлова В., Алексеева О., Молчанов А. (научные руководители доц. Новиков А.В., доц. Алексеева С.М.) [2].

Литература

1. Новиков А.В., Белов Ю.А., Рускол Д.Е. О некоторых вопросах управления динамикой развития популяции промысловых рыб. Сб. работ по теории оптимальных процессов. Калининград, КГУ, 1973, с. 32-48.
2. Алексеева О.Ю., Молчанов А.В., Алексеева С.М. Моделирование управления ловом рыбной популяции с учетом сохранения этой популяции. Математика и ее приложения: Межвузовский сборник научных трудов, выпуск 3(2011), СПб: Гос. ун-т водных коммуникаций, 2011, с. 108-114.

References

1. Novikov A.V., Belov YU.A., Ruskol D.E. O nekotoryh voprosah upravleniya dinamikoj razvitiya populyacii promyslovyh ryb. Sb. rabot po teorii optimal'nyh processov. Kaliningrad, KGU, 1973, pp.32-48.
2. Alekseeva O.YU., Molchanov A.V., Alekseeva S.M. Modelirovanie upravleniya lovom rybnnoj populyacii s uchetom sohraneniya etnoj populyacii. Matematika i ee prilozheniya: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov, vypusk 3(2011), SPb: Gos. un-t vodnyh kommunikacij, 2011, pp.108-114.

УДК 621.377

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОГНИТИВНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА**Александр Иванович Водяхо**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
e-mail: aivodyaho@mail.ru

Наталья Александровна Жукова

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
e-mail: nazhukova@mail.ru

Николай Васильевич Климов

аспирант
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49.
e-mail: hocico16@gmail.com

Ольга Олеговна Луковенкова

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований
Институт космических исследований и распространения радиоволн
684034 Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7
e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

Василий Юрьевич Осипов

доктор технических наук, профессор, руководитель лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий программирования
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39
e-mail: osipov_vasiliy@mail.ru

Александр Борисович Тристанов

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и информационных технологий,
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: alexander.tristanov@kigt.ru

Аннотация

В работе рассматривается подход к синтезу моделей когнитивных систем мониторинга. Когнитивные системы мониторинга представляют собой особый класс интеллектуальных систем, позволяющий эффективно решать задачи наблюдения за счет динамического изменения моделей внешней среды и самих систем. Предложенный подход развивает существующий теоретический и методический аппарат когнитивного мониторинга с позиций реализации таких систем. Проведен анализ актуального состояния исследуемой проблемы, показаны недостатки существующих подходов. Анализ состояния современных систем показал, что общий подход к построению когнитивных систем к настоящему времени не сформировался, а имеющиеся решения оказываются плохо применимы для построения когнитивных систем мониторинга. В работе формулирована задача синтеза модели вычислений, позволяющей обеспечить эффективное использование ресурсов при решении задачи когнитивного мониторинга. Предложен метод синтеза вычислительной модели.

Ключевые слова: когнитивные системы, интеллектуальный анализ, мониторинг.

COMPUTATIONAL MODELS OF COGNITIVE MONITORING SYSTEMS**Aleksandr I. Vodyakho**

Dsc in Engineering, Professor at the Department of Computer Engineering
Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU "LETI"
197376, Saint-Petersburg Санкт-Петербург, ul. Professora Popova, 5
e-mail: aivodyaho@mail.ru

Natalia A. Zhukova

PhD in Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of Information Technology Systems and Programming Technologies
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
199178, Saint-Petersburg, 14-th Liniya, VI, No. 39
e-mail: nazhukova@mail.ru

Nikolay V. Klimov

Postgraduate Student
St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
197101, Saint-Petersburg, Kronverkskiy prospekt, 49
e-mail: hocico16@gmail.com

Olga O. Lukovenkova

PhD in Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of Acoustic Research
Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
684034 Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, ul. Mirnaya, 7
e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

Vasiliy Yu. Osipov

Dsc in Engineering, Professor, Head of the Laboratory of Information Technology Systems and Programming Technologies
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
199178, Saint-Petersburg, 14-th Liniya, VI, No. 39,
e-mail: osipov_vasiliy@mail.ru

Tristanov A. Borisovich

PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Information Science and Information Technologies,
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: alexander.tristanov@klgtu.ru

Abstract

The paper considers an approach to the synthesis of models of cognitive monitoring systems. Cognitive monitoring systems are a special class of intelligent systems that allows you to effectively solve the problems of observation due to the dynamic changes in the external environment models and the systems themselves. The proposed approach develops the existing theoretical and methodological framework of cognitive monitoring from the standpoint of the implementation of such systems. The analysis of the current state of the problem under study has been carried out; the shortcomings of the existing approaches have been shown. Analysis of the state of modern systems has showed that the general approach to the construction of cognitive systems has not yet been formed, and the existing solutions are poorly applicable to the construction of cognitive monitoring systems. The paper formulates the task of synthesizing a computation model that allows for the efficient use of resources in solving the problem of cognitive monitoring. A method for the synthesis of a computational model has been proposed.

Key words: cognitive systems, data mining, monitoring.

Введение

Когнитивные системы мониторинга определяют достаточно крупный класс современных когнитивных систем (КС). Наблюдающийся в последнее время высокий интерес к этому классу информационных систем (ИС) обусловлен высокой востребованностью подобных ИС на практике. В связи с увеличением числа наблюдаемых объектов, сложности этих объектов, изменчивости их состояния существующие системы мониторинга оказываются не способными решать стоящие перед ними задачи. Область их эффективного применения ограничивается только задачами сбора данных. Такие задачи, как построение моделей объектов и ситуаций, оценка их состояния, оценка влияния внешних и внутренних факторов на возможные сценарии развития ситуаций, определение тенденций их развития, обоснование принимаемых решений, выработка управленческих воздействий

при непредвиденных обстоятельствах [1] с учетом взаимосвязи событий в настоящее время на машинном уровне практически не решаются. Их решение могут обеспечить когнитивные системы мониторинга (КСМ). КСМ должны позволить выполнять машинное управление процессами мониторинга наблюдаемых объектов. Такое управление должно осуществляться, исходя из решаемых прикладных задач.

КСМ формируют отдельный класс КС. Для КСМ накладываются ограничения на исходные данные и решаемые задачи. Исходные данные – это данные, поступающие от наблюдаемых объектов. Данные могут включать целевые данные и результаты измерений параметров состояния объекта. В состав решаемых задач входят задачи получения данных, их обработки, управление сбором данных об объектах.

КСМ – это интеллектуальные системы, которые в состоянии воспринимать информацию о состоянии внешнего мира, собственном состоянии, работающие с моделью внешнего мира и моделью самой себя.

Работа на уровне моделей позволяет КС, в отличие от просто ИС мониторинга, автоматически выполнять контентно-адаптивную обработку получаемых от наблюдаемых объектов информационных потоков. Контентно-адаптивной является обработка смыслового содержания информационных потоков с учетом наблюдаемого контекста, который определяется условиями мониторинга и поставленными целями. Такая обработка позволяет выявлять информационные элементы в потоках данных, устанавливать связи между ними. Получаемые связанные структуры могут рассматриваться как модели объектов реального мира, отражающие состояния этих объектов и их изменение в пространстве и во времени. В процессе функционирования ИС выполняется постоянное перестроение этих моделей.

В статье предлагается подход к построению КСМ. Этот подход развивает существующий теоретический и методический аппарат когнитивного мониторинга (КМ) [2]. В первом разделе статьи проводится анализ современных КС, используемых в них моделей, методов и архитектурных решений. Во втором разделе формулируется задача синтеза вычислительных моделей КС. В третьем разделе предлагается метод их синтеза. В заключительном разделе рассмотрен пример синтеза.

1. Анализ современных когнитивных систем и их возможностей

Некоторые модели, методы и архитектуры КС предложены в рамках исследований [3-7]. В ранних КС широко использовались такие формализмы как когнитивные карты, в которых определены факторы (элементы системы) и связи между ними [8, 9]. В более поздних системах стали применяться механизмы работы с паттернами ситуаций и механизмы слияния (fusion) [3, 10-12].

В соответствии с существующими подходами к созданию КС [13] модели представления информации и методы работы с ними классифицируются по типам когнитивных архитектур. Выделяют три типа когнитивных архитектур – символическую, эмерджентную и гибридную [10]. Для первого типа характерно использование продукционных, сетевых, фреймовых и других моделей представления знаний, для второго – применение ассоциативных нейросетевых методов, а также других конкурентных моделей и методов. Гибридные архитектуры предусматривают совместное использование моделей представления знаний и нейросетевых методов. Наиболее известными являются такие системы как SOAR [14], ICARUS [15], ACT-R [16], которые позиционируют себя как ИС с когнитивной архитектурой. Подробный обзор ИС с когнитивной архитектурой приведен в [4].

Первый подход к построению КС развивается достаточно давно. Ранние работы, выполненные в этом направлении, носили экспериментальный характер. Созданные КС оказались способны только

частично имитировать интеллектуальную деятельность человека за счет воспроизведения отдельных эвристических алгоритмов. В настоящее время внимание научных коллективов, работающих в этом направлении, сосредоточено, в основном, на исследовании статических когнитивных структур. Вопросы построения и использования динамических когнитивных структур практически не исследуются.

Значительная часть современных КС продолжает в той или иной мере использовать нейросетевой подход. Возможности применения нейросетевого подхода на практике существенно ограничены из-за высоких требований к вычислительным ресурсам. Также практическое применение этого подхода затрудняет сложность обоснования формируемых решений, что, как правило, приводит к снижению уровня доверия экспертов к таким моделям. Кроме того, отсутствие явных структур не позволяет выполнять многие операции над моделями, в частности, их преобразование, связывание и другие.

Не рассмотренными остаются архитектурные вопросы создания и сопровождения КС, в частности, вопросы накопления и использования архитектурных знаний, разработки гибких архитектур, а также механизмы самомониторинга и самонастройки таких систем.

Основная сложность использования готовых когнитивных моделей, методов и архитектур в интересах решения задач мониторинга и управления заключается в том, что в них не предусматривается управляемая перестройка при изменении условий мониторинга. В частности, не обеспечивается контентная адаптация при обработке данных, адаптация к изменяющимся требованиям мониторинга и управления, возможностям среды мониторинга.

Известны отдельные работы, в которых рассматриваются некоторые вопросы создания КС в интересах решения задач в области мониторинга и управления, но число их очень ограничено. Кроме того, практически все они ориентированы на решение частных задач для отдельных предметных областей. Например, в [25], рассматриваются возможные пути реализации когнитивных возможностей в сфере транспорта.

С точки зрения создания КМ существенный интерес представляет подход, ориентированный на работу с моделями объектов и процессов мониторинга. Этот подход получил значимое развитие в последнее время. В основу модельно-ориентированного подхода положены методы автоматического синтеза. Созданный аппарат определяет теоретические основы КСМ и предоставляет достаточно мощный методический аппарат. Поддержка такого аппарата на программном уровне требует построения гибких систем. Гибкость достигается за счет обоснованного выбора значений десятков настроечных параметров и их своевременной корректировки. Имеются отдельные реализации систем, настройка которых производилась IT специалистами. Для широкого распространения подхода необходимо разработать модели, определяющие способы реализации и конфигурирования КСМ на практике. К таким моделям, в первую очередь, относятся вычислительные модели этих систем.

2. Задача синтеза вычислительной модели

В широком смысле модель вычислений определяет поведение системы в целом, исходя из поведения её отдельных частей. Построение модели вычислений предполагает определение множества допустимых операций, используемых для вычислений, а также относительных издержек их применения. Модель вычислений позволяет охарактеризовать необходимые ресурсы – время выполнения, объём памяти, а также ограничения алгоритмов или технических средств. Основным назначением вычислительной модели является обеспечение возможности эффективного использования имеющихся ресурсов при решении задач КМ. При оценке вычислительных моделей могут также учитываться параметры формируемых моделей КМ. В первую очередь, в какой степени эти модели соответствуют реальным объектам и процессам, за которыми ведется наблюдение.

Вычислительные модели КСМ определяются тремя моделями. К ним относятся: модель требований, модель среды мониторинга и технологическая модель. Эти модели определяют условия построения вычислительных моделей, их структуру и параметры.

Модель требований R. Требования определяются моделями когнитивного мониторинга, способы синтеза которых определены в рамках общей теории КМ. КМ [26] Требования к вычислительной модели КМ изменяются в соответствии с изменениями наблюдаемых объектов и ситуаций.

Модель среды мониторинга E. Вычислительная модель строится в рамках существующей инфраструктуры среды мониторинга. Средам мониторинга свойственны следующие особенности. Это распределенные многоуровневые среды, параметры которых динамически изменяются. Системы мониторинга могут быть отнесены к многоуровневым системам. Уровни в них определяются типами используемых технических средств. Выделяются технические средства, размещаемые на наблюдаемых объектах, локальные сервера, кластеры серверов и другие.

Технологическая модель T. Вычисления могут предусматривать использование различных технологических решений для достижения поставленных целей мониторинга. Имеет место зависимость технологической модели от модели требований и модели среды мониторинга: $T(R, E)$.

Задача синтеза вычислительной модели КМ может быть сведена к синтезу способов распределения задач мониторинга между компонентами сред мониторинга и определению технологий, используемых для их решения.

Тогда, вычислительную модель можно определить как $C(R, E, T) = F(u(E), v(T), g(R))$, где $u(E)$ – функция распределения компонентов вычислительной модели по элементам среды мониторинга, $v(T)$ – функция определения технологий, используемых для решения задач мониторинга, $g(R)$ – функция определения ограничений для вычислительной модели мониторинга.

Требуется найти целесообразный способ B_0 построения вычислительной модели C_0 при котором достигается W_{opt} – экстремум основного показателя

эффективности (объема эффективно потребляемых ресурсов) при ограничениях на вспомогательные показатели эффективности $M(B_v)$ (параметры моделей когнитивного мониторинга)

$$W_{opt}(B_0) = \text{extr}_{v \in \Lambda} \{W_v(M(B_v))\},$$

где Λ – множество вариантов построения вычислительных моделей

$$M(B_v) = F(R(B_v), E(B_v), T(B_v)),$$

где $M(B_v) \in DM$, DM – область допустимых значений параметров моделей когнитивного мониторинга; $R(B_v) \in DR$, DR – область допустимых изменений требований к мониторингу; $E(B_v) \in ER$, ER – ограничения, определяемые параметрами среды мониторинга; $T(B_v) \in ET$, ET – множество допустимых технологий.

Как модель, так и способ ее построения определяются на каждый момент времени t_k . Таким образом, на интервале времени $[t_{k-t}, \dots, t_{k+t}]$ определяются $2t+1$ моделей:

$$\langle \{B_0(t_{k-t+i}), C_0(t_{k-t+i})\}_0^{2t} \rangle.$$

3. Метод синтеза вычислительной модели

Модель процессов КМ можно в общем виде представить как систему взаимосвязанных когнитивных функций F , обеспечивающих построение моделей объектов реального мира. Схематично модель процесса показана на рис.1. На рис.1 приняты следующие обозначения: s – вход процесса когнитивного мониторинга, w – выход процесса.

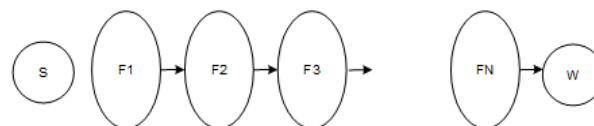


Рис. 1. Структура модели процесса когнитивного мониторинга

Модель среды когнитивного мониторинга представляет собой совокупность входящих в нее элементов E . Возможная структура среды, включающая 6 структурных элементов, показана на рис. 2.

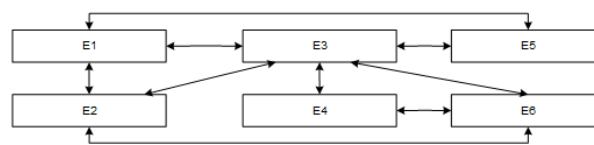


Рис. 2. Структура среды когнитивного мониторинга

Технологическая модель когнитивного мониторинга определяется как совокупность технологических стеков. При этом каждый стек содержит технологии, аналогичные по своему назначению, но отличающиеся характеристиками. Пример технологической модели, поддерживающей три стека (S-1, S-2, S-3), показан на рис. 3. На рис.3 используется обозначение S -<идентификатор стека>-<идентификатор уровня стека>.

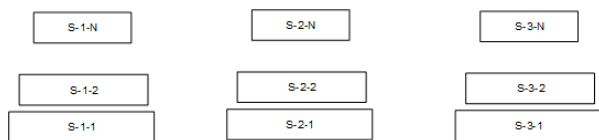


Рис. 3 Структура технологической модели

В соответствии с рассмотренными структурами, вычислительную модель можно представить в виде трехмерной бинарной матрицы $A = \{a_{i,j,k}, a_{i,j,k} \in \{0, 1\}\}$. При этом i -е измерение отражает реализуемые когнитивные функции, j -е измерение – компоненты среды мониторинга, k -е – компоненты технологического стека. В такой матрице элемент устанавливается равным единице в случае, если i -я когнитивная функция реализуется на j -м компоненте с использованием k -й технологии. Проекция матрицы в двумерное пространство $j \times k$, т.е. в пространство компонентов среды мониторинга и компонентов технологического стека для выбранного элемента пространства показано на рис. 4а.

Для синтеза таких структур предлагается использовать относительно конечные операционные автоматы (ОКА) [17, 18]. Схема синтеза вычислительной модели показана на рис.4б.

В соответствии с [27] Каждый автомат OKA_r на r -й момент времени задается совокупностью десяти параметров:

$$OKA_r = \{\bar{d}_a, \bar{d}_b, \bar{d}_c, F_r^b, F_r^c, DA(\bar{d}_{b-1}), DB(\bar{d}_{b-1}), DC(\bar{d}_{b-1}), FB(\bar{d}_{b-1}), FC(\bar{d}_{b-1})\},$$

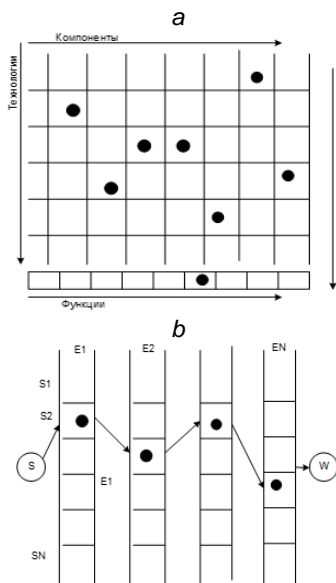


Рис. 4 Синтез вычислительной модели: а – проекция вычислительной модели в двумерное пространство $j \times k$; б – схема синтеза вычислительной модели

где \bar{d}_a – вектор входных данных; \bar{d}_b – вектор параметров внутреннего состояния; \bar{d}_c – вектор параметров состояния выхода. Функции F_r^b переходов автомата из одного внутреннего состояния в другое и функции F_r^c записываются в виде:

$$\bar{d}_{b,r+1} = F_r^b(\bar{d}_a, \bar{d}_b), \quad \bar{d}_c = F_r^c(\bar{d}_a, \bar{d}_b).$$

Состояния $\bar{d}_a, \bar{d}_b, \bar{d}_c$ и функции F_r^b, F_r^c , характеризующие автомат на r -й момент времени, должны удовлетворять определенным условиям:

$$\bar{d}_a \in DA(\bar{d}_{b-1}), \quad \bar{d}_b \in DB(\bar{d}_{b-1}), \quad \bar{d}_c \in DC(\bar{d}_{b-1}),$$

$$F_r^b \in FB(\bar{d}_{b-1}), \quad F_r^c \in FC(\bar{d}_{b-1}),$$

где $DA(\bar{d}_{b-1}), DB(\bar{d}_{b-1}), DC(\bar{d}_{b-1}), FB(\bar{d}_{b-1}), FC(\bar{d}_{b-1})$ – допустимые множества состояний и функций автомата, определенных относительно $r-1$ момента времени. Переход от автомата OKA_r к автомату OKA_{r+1} на $r+1$ -момент можно записать в виде:

$$F_r^b : OKA_r, \bar{d}_a \rightarrow OKA_{r+1}.$$

Предусматривается построение своего автомата для каждой из функций. В результате вычислительная модель на момент времени r будет описываться семейством автоматов:

$$FOKA = \{OKA(F_1), OKA(F_2), \dots, OKA(F_N)\}.$$

OKA для различных функций могут строиться в произвольном порядке.

При синтезе OKA для i -й функции могут учитываться другие, ранее синтезированные автоматы, тогда имеет место зависимость $FOKA_r(FOKA_{r-1})$. Подобный подход оправдан, когда некоторые функции могут быть выражены через другие функции, т.е. $F_k = G(F_i), i \in \{1..N\}$. В этом случае можно говорить о системе взаимосвязанных автоматов.

Заключение

Рассмотренный подход к построению вычислительных моделей расширяет возможности синтеза развивающихся (перестраивающихся) когнитивных систем мониторинга и позволяет считать его элементом методологической базы теории КСМ.

Отметим, что рассматриваемые модели могут быть использованы в широком спектре прикладных областей, требующих создания гибких и надежных систем контроля, включая систем безопасности.

Литература

1. Encyclopedia of Management. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.enotes.com/management-encyclopedia/management-thought> (дата обращения 15.10.2018).
2. Osipov V. Yu., Zhukova N. A., Vodyaho A. I., Kalmatsky A., Mustafin N. G. Towards Building of Cable TV Content-Sensitive Adaptive Monitoring and Management Systems / International Journal of Computers and Communications. Vol. 11, 2017, pp. 75-81
3. Glodek M., Honold F., Geier T., Krell G., Nothdurft F., Reuter S., Schüssel F., Hörnle T., Dietmayer K., Minker W., Biundo S., Weber M., Palm G., Schwenker F. Fusion paradigms in cognitive technical systems for human-computer interaction // Journal Neurocomputing archive. Vol. 161. Issue C, 2015, P. 17–37.
4. Goertzel B., Lian R., Arel I., Garis H., Chen S. World survey of artificial brains, Part II: Biologically inspired cognitive architectures // Journal Neurocomputing archive. 74, 2010, P. 30–49.
5. Madla T., Chena K., Montaldi D., Trapp R. Computational cognitive models of spatial memory in navigation space: A review // Neural Networks. 65, 2015, P.18–43.
6. Haikonen P. The Role of Associative Processing in Cognitive Computing // Cognitive Computation. 1(1), 2009, P. 42–49.
7. Загоруйко, Н. Г. Когнитивный анализ данных. – Академическое издательство «ГЕО», 2012. 203 с.
8. Axelrod R. The cognitive mapping approach to decision making. In: Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites. – Princeton: Princeton University Press, 1976. P. 3–17.
9. Авдеева З.К. Сравнительный анализ выборочных когнитивных карт по степени формализации // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2009): Труды Международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2009. С.11-22.
10. Duch W., Oentaryo R., Pasquier M., Cognitive architectures: where do we go from here? // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2008.
11. Gardner K. M., Rush A., Crist M. K., Teegarden B., Konitzer R. K. Cognitive Patterns: Problem-Solving Frameworks for Object Technology. Zurich, Switzerland, 2011. 166 p.
12. Perlovsky L. I. Cognitive high level information fusion // Information Sciences. 177, 2007, pp. 2099-2118.
13. Kotseruba J., Tsotsos J. K. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications. Artificial Intelligence Review, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9646-y> (дата обращения 15.10.2018).
14. Laird J., Rosenbloom P., Newell A. SOAR: an architecture for general intelligence // Artificial Intelligence. 33(1), 1987, pp. 1–64.
15. Langley P. An adaptive architecture for physical agents // Proceedings of the 2005 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. 2005. DOI:10.1109/WI.2005.24.
16. Anderson J. R., Lebiere C. The newell test for a theory of cognition // Behavioral and Brain Sciences. 26, 2003, pp. 587–640.
17. Osipov V. Y. Automatic synthesis of action programs for intelligent robots /Programming and Computer Software. Volume 42, Issue 3, 1 April 2016, pp. 155-160/
18. Osipov, V.Y., Vodyaho, A.I., Zhukova, N.A., Glebovsky, P.A. Multilevel Automatic Synthesis of Behavioral Programs for Smart Devices / Proceedings - 2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization, ICCAIRO 2017 Volume 2018-January, 9 January 2018, pp 335-340.

References

1. Encyclopedia of Management. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.enotes.com/management-encyclopedia/management-thought> (date of the application 15.10.2018).
2. Osipov V. Yu., Zhukova N. A., Vodyaho A. I., Kalmatsky A., Mustafin N. G. Towards Building of Cable TV Content-Sensitive Adaptive Monitoring and Management Systems, International Journal of Computers and Communications. Vol. 11, 2017, pp. 75-81
3. Glodek M., Honold F., Geier T., Krell G., Nothdurft F., Reuter S., Schüssel F., Hörnle T., Dietmayer K., Minker W., Biundo S., Weber M., Palm G., Schwenker F. Fusion paradigms in cognitive technical systems for human-computer interaction, Journal Neurocomputing archive. Vol. 161. Issue C, 2015, pp. 17–37.
4. Goertzel B., Lian R., Arel I., Garis H., Chen S. World survey of artificial brains, Part II: Biologically inspired cognitive architectures, Journal Neurocomputing archive. 74, 2010, pp. 30–49.
5. Madla T., Chena K., Montaldi D., Trapp R. Computational cognitive models of spatial memory in navigation space: A review, Neural Networks. 65, 2015, P.18–43.
6. Haikonen P. The Role of Associative Processing in Cognitive Computing, Cognitive Computation. 1(1), 2009, pp. 42–49.
7. Zagorujko, N. G. Kognitivnyj analiz dannykh, Akademicheskoe izdatel'stvo «GEO», 2012, 203 s.
8. Axelrod R. The cognitive mapping approach to decision making. In: Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites, Princeton: Princeton University Press, 1976, pp. 3–17.
9. Avdeeva Z.K. Sravnitel'nyj analiz vyborochnykh kognitivnykh kart po stepeni formalizatsii, Kognitivnyj analiz i upravlenie razvitiem situatsij (CASC'2009): Trudy Mezhdunarodnoj konferentsii. M.: IPU RAN, 2009, pp.11-22.
10. Duch W., Oentaryo R., Pasquier M., Cognitive architectures: where do we go from here?, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2008.
11. Gardner K. M., Rush A., Crist M. K., Teegarden B., Konitzer R. K. Cognitive Patterns: Problem-Solving Frameworks for Object Technology, Zurich, Switzerland, 2011, 166 p.
12. Perlovsky L. I. Cognitive high level information fusion. Information Sciences. 177, 2007, pp. 2099–2118.

13. Kotseruba J., Tsotsos J. K. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications. *Artificial Intelligence Review*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9646-y> (date of the application 15.10.2018).
14. Laird J., Rosenbloom P., Newell A. SOAR: an architecture for general intelligence, *Artificial Intelligence*. 33(1), 1987, pp. 1–64.
15. Langley P. An adaptive architecture for physical agents, *Proceedings of the 2005 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*. 2005. DOI:10.1109/WI.2005.24.
16. Anderson J. R., Lebiere C. The newell test for a theory of cognition, *Behavioral and Brain Sciences*. 26, 2003, P. 587–640.
17. Osipov V. Y. Automatic synthesis of action programs for intelligent robots, *Programming and Computer Software*. Volume 42, Issue 3, 1 April 2016, pp. 155-160
18. Osipov, V.Y., Vodyaho, A.I., Zhukova, N.A., Glebovsky, P.A. Multilevel Automatic Synthesis of Behavioral Programs for Smart Devices, *Proceedings - 2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization, ICCAIRO 2017 Volume 2018-January*, 9 January 2018, pp. 335-340.

УДК 551.510.535

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ НИЖНЕЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЙ

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@list.ru

Виктория Евгеньевна Еремичева

доцент кафедры информатики и информационных технологий
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: viksik@mail.ru

Антон Дмитриевич Колин

ассистент кафедры информатики и информационных технологий
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: yojik14@gmail.com

Аннотация

В настоящее время исследование возмущенных условий ионосферы связано в основном с E- и F2-областями, так как для них накоплен достаточно большой экспериментальный материал. Нижняя же часть ионосферы на интервале высот 50-100 км (C- и D-область) труднодоступна для натуральных экспериментов. Эта область высот достигается в основном геофизическими ракетами, что является дорогостоящим способом исследований.

В последнее время проводился ряд экспериментов по свечению возбужденных компонентов O, O₂, O₃, OH, NO₂, CO₂, что позволило построить ряд эмпирических моделей этих эмиссий.

В данной работе представлена фотохимическая модель D-области ионосферы и результаты вычислительного эксперимента влияния различных возмущений на концентрации заряженных компонент, которые определяют условия распространения электромагнитных волн.

Математическая модель описывает высотно-временное распределение концентраций положительных ионов-связок вида $Y^+ = Cl_1^+ + Cl_2^+ + O_2^+ + NO^+$ ($[Cl_1^+] = \sum_n NO^+(H_2O)_n$, $[Cl_2^+] = \sum_n H^+(H_2O)_n$), отрицательных ионов $Y^- = K^- + C^- + N^-$ (кислородных $[K^-] = [O^-] + [O_2^-] + [O_3^-]$, углеродных $[C^-] = [CO^-] + [CO_2^-] + [CO_3^-]$, азотных $[N^-] = [NO_2^-] + [NO_3^-]$) и электронов.

Математическая модель состоит из системы «жестких» нестационарных дифференциальных уравнений первого порядка (задача Коши). Такая система решается численно с автоматическим выбором шага по времени. На основании данной модели впервые были получены количественные результаты, показывающие существенное влияние гравитационной волны на перераспределение электронной концентраций D-области ионосферы.

Ключевые слова: ионосферный параметр, метастабильный компонент, ионосферная плазма, экзотермическая реакция, фотохимическая схема, численные методы, электронная концентрация.

MATHEMATICAL MODELING OF THE REACTIONS OF THE LOWER IONOSPHERIC REGION FOR DISTURBED CONDITIONS

Vladimir V. Medvedev

DSc in Physics and Mathematics,
Professor at the Department of Information Science and Information Technologies
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: vmedvedev2012@list.ru

Viktoriya E. Eremicheva

Associate Professor at the Department of Information Science and Information Technologies
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: viksik@mail.ru

Anton D. Kolin

Assistant at the Department of Information Science and Information Technologies
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: yojik14@gmail.com

Abstract

At present, the study of the disturbed conditions of the ionosphere is mainly associated with the E and F2 regions, since sufficiently large experimental material has been accumulated. The lower part of the ionosphere at the altitude range of 50–100 km (C and D regions) is difficult to access for full-scale experiments. This area is achieved mainly by geophysical rockets, which is an expensive method of research.

Recently, a series of experiments have been carried out on the emission of excited components O , O_2 , O_3 , OH , NO_2 , CO_2 , which made it possible to construct a number of empirical models of these emissions.

This paper presents a photochemical model of the D-region of the ionosphere and the results of a computational experiment of the influence of various perturbations on the concentration of charged components, which determine the propagation conditions of electromagnetic waves.

A mathematical model describes the altitude-time distribution of the concentrations of positive ion-bonds of the form $Y^+ = Cl_1^+ + Cl_2^+ + O_2^+ + NO^+$ ($[Cl_1^+] = \sum_n NO^+(H_2O)_n$, $[Cl_2^+] = \sum_n H^+(H_2O)_n$), negative ions $Y^- = K^- + C^- + N^-$ (oxygen $[K^-] = [O^-] + [O_2^-] + [O_3^-]$, carbon $[C^-] = [CO^-] + [CO_2^-] + [CO_3^-]$, nitrogen $[N^-] = [NO_2^-] + [NO_3^-]$) and electrons.

The mathematical model consists of a system of "stiff" non-stationary differential equations of the first order (Cauchy problem). Such a system is solved numerically with the automatic selection of a time step. On the basis of this model, quantitative results have been obtained for the first time, showing a significant influence of the gravitational wave on the redistribution of the electron concentrations of the D region of the ionosphere.

Key words: ionospheric parameter, metastable component, ionospheric plasma, heat generating reaction, photochemical scheme, numerical methods, electron density.

Введение

Хорошо известно, что нижняя область ионосферы (D-область) на высоте 50-100 км является природным отражателем длинных волн. Знание природы этой области - физических и химических процессов, происходящих в ней – необходимо для надежного обеспечения связи с подводными и надводными кораблями. В то же время проведение натуральных экспериментов затруднено в связи с труднодоступностью этих высот. Единственным достаточно устойчивым методом исследования является вычислительный эксперимент. В данной работе представлен контрольный пример проведения вычислительного эксперимента для возмущенных условий.

1. Постановка математической задачи

В работах [1-4] была построена математическая модель D-области ионосферы и исследован ряд возмущенных условий в этой области. В настоящей работе количественно исследуется поведение заряженных частиц в ионосфере в диапазоне высот $h=50-90$ км. Фотохимические процессы в D-области ионосферы рассматриваются на основе упрощенной модели преобразования положительных (рис. 1а) и отрицательных (рис. 1б) ионов, учитывающих зависимость скоростей преобразования ионов одних сортов в другие от электронной плотности и таких

метеорологических параметров, как температура газа (T) и концентрации малых нейтральных составляющих H_2O , O , NO , $O_2(^1\Delta_g)$, O_3 , CO_2 .

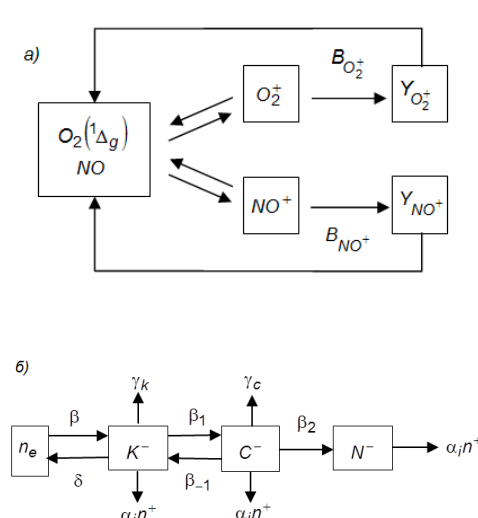


Рис. 1. Упрощенная модель преобразования положительных (а) и отрицательных (б) ионов в D-области ионосферы

В условиях возмущения ионосферы, в предположении полного увеличения заряженных частиц нейтральным газом, уравнения непрерывности для концентрации j -го иона записывались в виде (1)

$$\frac{dn_j}{dt} = q_j \frac{\rho(t)}{\rho_0} + P_j - n_j L_j + n_j \frac{d}{dt} \ln \left(\frac{\rho(t)}{\rho_0} \right), \quad (1)$$

$j=1, \dots, 7$, где P_j, L_j – скорости образования и потерь j -го иона в фотохимических процессах.

При моделировании возмущенных условий считалось, что изменения плотности $\rho(t)$ и температуры среды $T(t)$ определяются адиабатическим законом (2)

$$\frac{\rho(t)}{\rho_0} = \left(1 + \frac{\Delta\rho(t)}{\rho_0} \right)^{1/\gamma}, \quad \frac{T(t)}{T_0} = \left(1 + \frac{\Delta\rho(t)}{\rho_0} \right)^{\gamma-1} \quad (2)$$

где ρ_0, T_0 – плотность и температура невозмущенной атмосферы на заданной высоте, $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты идеального газа.

Система (1) из 7 дифференциальных уравнений с учетом (2) численно интегрировалась по неявной разностной схеме (3):

$$n_j^{k+1} = \frac{P_j^k + n_j^k / \tau}{L_j^k + 1/\tau} \quad (3)$$

где τ, k – шаг и номер временного слоя.

Известно, что расчет электронной концентрации из условия квазинейтральности $N_e = Y^+ - Y^-$ дает относительную ошибку более 100%, поэтому вычисления проводились по схеме (4)-(5):

$$\begin{cases} \frac{\partial Y^+}{\partial t} = P_1 - (\alpha_1 N_e + \alpha_2 Y^-) Y^+ \\ \frac{\partial Y^-}{\partial t} = N_e P_2 - (\gamma + \alpha_2 Y^+) Y^- \\ [Y^+] = [Y^-] + [N_e] \end{cases}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_e}{dt} = f - \alpha N_e \rightarrow N_e^{k+1} = \frac{f + \frac{N_e^k}{\tau}}{\frac{1}{\tau} + (P_2 + \alpha_1 Y^+)^k} \quad (5)$$

где $Y^+ = Cl_1^+ + Cl_2^+ + O_2^+ + NO^+$, $Y^- = K^- + C^- + N^-$, [1-4].

2. Результаты расчетов

В процессе вычислений учитывается, что система (4) является жесткой, в связи с этим изменяется шаг интегрирования τ по времени.

Вычислительные эксперименты проводились для различных значений амплитуд A , периодов T и фаз по формуле (6):

$$\rho(t) = \rho_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (6)$$

где $0 < \rho_0 \leq A$, $0 \leq t \leq T$.

Предполагалось, что модельные функции $\frac{\Delta\rho(t)}{\rho_0}$, соответствующие перепаду давления в акустико-гравитационной и инфразвуковой волне, являются синусоидальными.

Результаты расчетов возмущенной концентрации заряженных частиц в нижней ионосфере, вызываемых акустико-гравитационной волной с периодом $T=18$ мин и амплитудой $A=0,3$ представлены на рис. 2.

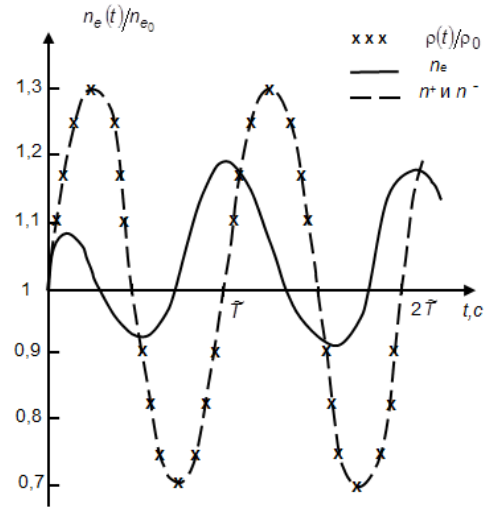


Рис. 2. Зависимость относительных концентраций заряженных частиц от времени ($h=60$ км, $T=18$ мин, $A=0,3$)

Как видим, изменение относительных концентраций n^+ и n^- повторяет изменение плотности среды. В то же время, в поведении электронной концентрации наблюдаются заметные отклонения от изменений $\rho(t)$.

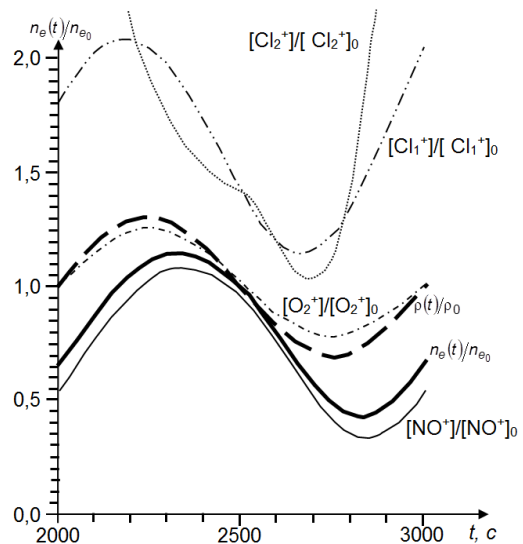


Рис. 3. Изменение концентраций положительных ионов за один период ($h=80$ км, $T=1000$ с, $A=0,3$)

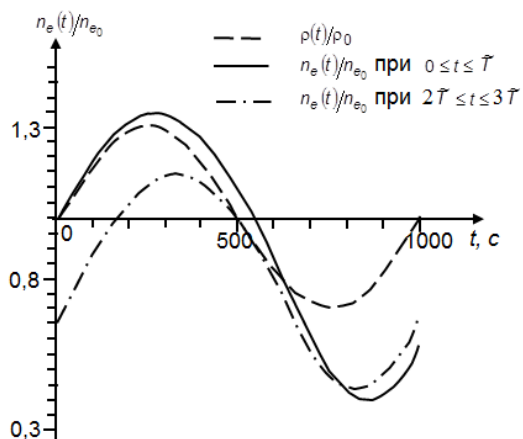


Рис. 4. Изменение относительной электронной плотности в течение 1 и 3 периода колебаний ($h=80$ км, $T=1000$ с, $A=0,3$)

Это объясняется тем, что электронная плотность контролируется процессом диссоциативной рекомбинации со средним коэффициентом (7):

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{1 + f^+} \left(\bar{\alpha}(NO^+, O_2^+) + f^+ \cdot \bar{\alpha}(Cl^+) \right) \quad (7)$$

где $f^+ = ([Cl_1^+] + [Cl_2^+]) / ([NO^+] + [O_2^+])$ - относительное содержание ионов-связок, $\bar{\alpha}(NO^+, O_2^+)$ - средний коэффициент диссоциативной рекомбинации ионов NO^+ и O_2^+ , $\bar{\alpha}(Cl^+)$ - средний коэффициент рекомбинации ионов-связок.

Увеличение температуры среды в фазе сжатия приводит к распаду положительных ионов-связок и росту концентраций простых ионов, так, как эффективная скорость образования Cl_1^+ и Cl_2^+ , и, соответственно, скорость исчезновения простых ионов существенно зависит от температуры среды. Указанный эффект виден на рис. 3 и 5.

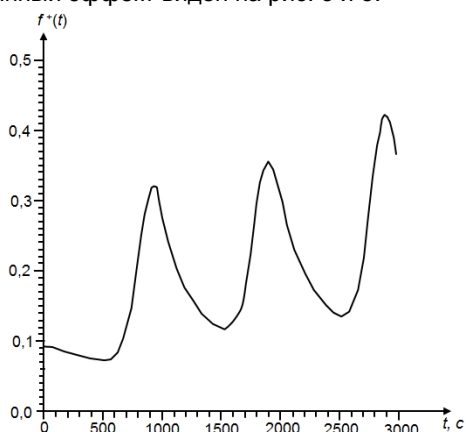


Рис. 5. Изменение во времени параметра f^+ при прохождении акустико-гравитационной волны ($h=80$ км, $T=1000$ с, $A=0,3$)

Вариации $f^+(t)$ коррелируют с вариациями плотности, а, следовательно, и температуры среды.

В фазе сжатия температура растет, а f^+ уменьшается, и наоборот, в фазе разрежения наблюдается падение температуры и увеличение f^+ .

Коэффициент $\bar{\alpha}$ зависит от f^+ , а, следовательно, и от температуры среды таким образом, что увеличение температуры приводит к уменьшению $\bar{\alpha}$ и к увеличению $n_e(t)$.

Результаты расчетов изменения плотности заряженных компонент D-области при прохождении акустической волны на высоте $h=80$ км с периодом $T=10$ с и амплитудой $A=0,3$ представлены на рис. 6.

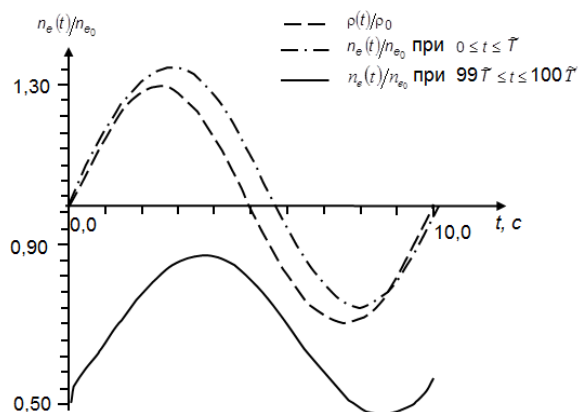


Рис. 6. Изменение относительной электронной плотности заряженных компонент D-области при прохождении акустико-гравитационной волны ($h=80$ км, $T=10$ с, $A=0,3$)

Так как на высоте $h=80$ км характерное время химических процессов сравнимо с периодом акустической волны, нарушения фотохимического равновесия на одном периоде колебаний не происходит (электронная концентрация "следит" за изменениями плотности среды).

При прохождении акустической и акустико-гравитационной волны наблюдается эффект "отрыва" вариаций $n_e(t)/n_e0$ от $\rho(t)/\rho0$. На высоте 80 км амплитуда вариаций $n_e(t)/n_e0$ приблизительно в два раза больше амплитуды колебаний плотности нейтрального газа.

Указанный эффект необходимо учитывать при интерпретации результатов радиофизических измерений вариаций $n_e(t)$, связанных с воздействием на нижнюю ионосферу акустических и акустико-гравитационных волн. Это особенно важно при восстановлении параметров акустической волны, ответственной за вариации отраженного от ионосферы радиосигнала, по результатам радиофизических измерений, так как амплитуды, периоды и фазы вариаций $n_e(t)$ не совпадают с параметрами акустической и акустико-гравитационной волны.

Заключение

В данной работе рассмотрена постановка задачи упрощенной математической модели нижней

области ионосферы с учетом химических процессов, что позволило впервые получить количественные результаты. Приведенные оценки показывают, что гравитационная волна может оказывать

существенное влияние на перераспределение электронной концентрации D-области ионосферы, ответственной за отражение радиосигнала.

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. Медведев В.В. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент в ионосферной физике / В. В. Медведев, В. А. Телегин, В. Е. Еремичева // V Международный Балтийский морской форум. XV Международная научная конференция «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве - 2017»: тезисы докладов. Часть 2. Калининград: Издательство БГАРФ, 2017. С. 90.
3. Медведев В. В. Метастабильные компоненты в термосфере Земли / В. В. Медведев, В. А. Телегин, В. Е. Еремичева // V Международный Балтийский морской форум. XV Международная научная конференция «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве - 2017»: тезисы докладов. Часть 2. Калининград: Издательство БГАРФ, 2017. С. 91.
4. 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.

References

1. Medvedev V.V., Pyalov D.I., Zamyatina O.V. Mathematical Model for the Processes Ionosphere and Upper Atmosphere. AIS-2010: Atmosphere, ionosphere, safety: book of Abstracts; Supported by Russian Foundation of Basic Research. Kaliningrad, 2010, pp. 225-226.
2. Medvedev V.V., Telegin V. A., Eremicheva V. E. Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyy eksperiment v ionosfernoy fizike [Mathematical modeling and computing experiment in ionospheric physics] V Mezhdunarodnyy Baltiyskiy morskoy forum. XV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Innovatsii v nauke, obrazovanii i predprinimatel'stve - 2017»: teziy dokladov. Chast' 2 [V International Baltic Maritime Forum. XV International scientific conference «Innovations in science, education and entrepreneurship-2017»: abstracts. Part 2]. Kaliningrad, BGARF Publ, 2017. 90 p.
3. Medvedev V. V., Telegin V. A., Eremicheva V. E. Metastabil'nye komponenty v termosfere Zemli [Metastable Components in the Earth Thermosphere]. V Mezhdunarodnyy Baltiyskiy morskoy forum: XV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Innovatsii v nauke, obrazovanii i predprinimatel'stve 2017»: teziy dokladov. Chast' 2 [V International Baltic Maritime Forum. XV International scientific conference «Innovations in science, education and entrepreneurship-2017»: abstracts.Part 2]. Kaliningrad, Publ. BGARF, 2017, p. 91.
4. Medvedev V. V, Eremicheva V. E., Timofeeva I. V. Rezul'taty chislennogo rascheta vysotnogo raspredeleniya kislorodnykh komponentov verkhney atmosfery Zemli [Results of numerical calculation of the altitude distribution of oxygen components of the Earth upper atmosphere]. Morskije intellektual'nye tekhnologii, 2017, 1(3), pp. 163-167.

УДК 519.2:551.55

МАКСИМАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СКОРОСТИ ВЕТРА В БАЛТИЙСКОЙ ВОЕННО-МОРСКОЙ БАЗЕ

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

Аннотация

Цель статьи – получить максимальные расчетные годовые скорости ветра заданной вероятности превышения в городе Балтийске, необходимые для оценки воздействия порывов ветра на береговую инфраструктуру военно-морской базы. Задачи исследования: проверка достаточной длины и однородности ряда максимальных скоростей ветра; построение теоретического распределения максимальной годовой скорости ветра; определение максимальных расчетных годовых скоростей ветра в Балтийске заданной обеспеченности (вероятности превышения). Проведенный статистический анализ ряда максимальных годовых скоростей (порывов) ветра в Балтийске подтвердил его однородность и достаточную длину для построения теоретического распределения. Данные измерений максимальных скоростей ветра удовлетворительно согласуются с результатами расчета по закону распределения Гумбеля. Отклонение экспериментальных точек от теоретической зависимости связано с инструментальным эффектом. Построен график повторяемости максимальных годовых скоростей ветра в Балтийске. Примерно один раз в 100 лет скорость ветра может достигнуть 38 м/с. Получено аналитическое выражение и рассчитана таблица значений максимальных годовых скоростей ветра в Балтийске заданной вероятности превышения. При обеспеченности 0,5 % расчетная скорость ветра составляет 39,7 м/с.

Ключевые слова: порывы ветра, максимальная годовая скорость, город Балтийск, распределение Гумбеля, вероятность превышения.

MAXIMUM RATED WIND SPEEDS IN THE BALTIC NAVAL BASE

Vladimir A. Naumov

DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Aquatic Resources and Water Management
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: van-old@mail.ru

Abstract

The purpose of the article is to obtain maximum rated annual wind speeds of a given exceedance probability in the city of Baltiysk, necessary to assess the impact of wind gusts on the coastal infrastructure of the naval base. Research objectives: verification of sufficient length and uniformity of a number of maximum wind speeds; construction of predicted distribution of the maximum annual wind speed; determination of the maximum rated annual wind speeds in Baltiysk of a given probability (exceedance probability). The statistical analysis of a number of maximum annual wind speeds (gusts) in Baltiysk has confirmed its uniformity and sufficient length to construct a theoretical distribution. The measurement data of maximum wind speeds are in satisfactory agreement with the results of the calculation according to the Gumbel distribution law. Deviation of the experimental points from the theoretical dependence is associated with the instrumental effect. Repeatability of the maximum annual wind speeds in Baltiysk has been plotted. Once every 100 years, the wind speed can reach 38 m / s. An analytical expression has been obtained and a table of the values of the maximum annual wind speeds in Baltiysk of the given exceedance probability has been calculated. With a probability of 0.5%, the estimated wind speed is 39.7 m / s.

Key words: wind gusts, maximum annual speed, Baltiysk, Gumbel distribution, exceedance probability.

Введение

Балтийская военно-морская база – основное место базирования Балтийского флота Российской Федерации. Инфраструктура базы располагается в городе Балтийске Калининградской области. Этот регион относят к «Балтийскому ветровому коридору» [1], для которого характерна повышенная ветровая активность по сравнению с другими районами побережья Балтийского моря.

Сильный ветер может серьезно осложнить или даже нарушить нормальное функционирование береговой инфраструктуры. Так в ноябре 2011 года мощный порыв ветра сорвал крышу и повредил оборудование предприятия «Оборонэнерго», которое снабжало электроэнергией военно-морскую базу и гражданские объекты города Балтийска. Подача электроэнергии прекратилась, системы жизнеобеспечения города вышли из строя. В критической ситуации оказались более 30 тысяч

человек. Заместитель командующего Балтийским флотом М. Урюпин сообщил средствам массовой информации: «В воинских частях Балтийского флота развернуты резервные источники энергоснабжения. Данная аварийная ситуация ни в коей мере не повлекла за собой снижения обороноспособности» [2].

Для оценки воздействия ветровой нагрузки на работу оборудования и систем морского порта необходимо знать их вероятностные характеристики (см. [3-6] и библиографию). Изучению экстремальных величин скорости ветра на побережье Балтийского моря посвящены работы многих исследователей. Результаты изучения порывов ветра и пространственных ветровых явлений на островах и побережье Эстонии представлены в [7]. В [8] по данным 50 лет наблюдений получено теоретическое распределение максимальной скорости ветра в южной части Балтийского региона на полуострове Дарс-Цингст.

Исследования ветровых потоков были выполнены и для Калининградской области (см., например, [1, 9]). Работа [1] основана на данных наблюдений более чем 30-летней давности, затрагивает, в основном, продолжительность и повторяемость штормовых ветров. Представленные результаты (например, табл. 1) не позволяют построить теоретическую кривую распределения максимальных скоростей ветра и найти важные для инженерных приложений значения определенной вероятности превышения P .

Таблица 1

Повторяемость сильных ветров по метеостанции Балтийск (1966-1985) [1]

V , м/с	12-14	15-18	19-21	21-25	26 и выше
Z , %	30,9	57,3	8,3	2,1	1,4

В табл. 1: V – максимальная годовая скорость ветра, Z – повторяемость.

1. Цель и задачи исследования

Цель статьи – получить максимальные расчетные годовые скорости ветра в Балтийске заданной вероятности превышения, необходимые для оценки воздействия порывов ветра на береговую инфраструктуру военно-морской базы. Задачи исследования:

- проверка достаточной длины и однородности ряда максимальных скоростей ветра;
- построение теоретического распределения максимальной годовой скорости ветра;
- определение максимальных расчетных годовых скоростей ветра в Балтийске заданной обеспеченности (вероятности превышения).

2. Статистический анализ ряда

2.1. Исходные данные

Федеральный ресурс [10] содержит базовые массивы данных по основным метеорологическим элементам в рамках реализации концепции глобальной рамочной основы для климатического обслуживания, согласно которой должно быть обеспечено функционирование открытого полноценного доступа к специализированным климатическим массивам исторических данных

через Интернет. Наблюдения выполняются 8 раз в сутки, через каждые 3 часа. В источнике данных наблюдения по метеостанции № 26701 (Балтийск) есть результаты наблюдений за скоростью ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью с 1976 года по настоящее время (рис. 1).

На рис. 2 для примера показаны максимальные скорости ветра в Балтийске в ноябре 1981 года. Видно, что в указанном месяце величина V дважды достигала 34 м/с.

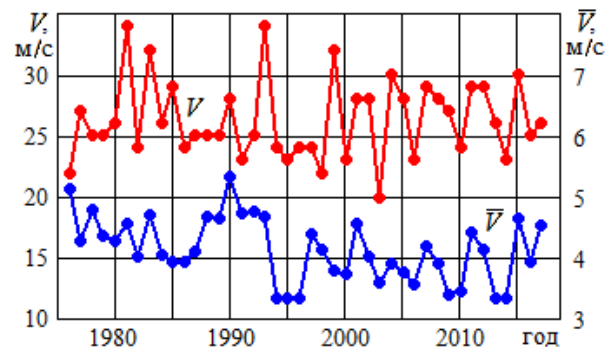


Рис. 1. Максимальные и средние годовые скорости ветра в Балтийске (1976-2017) по данным [10]

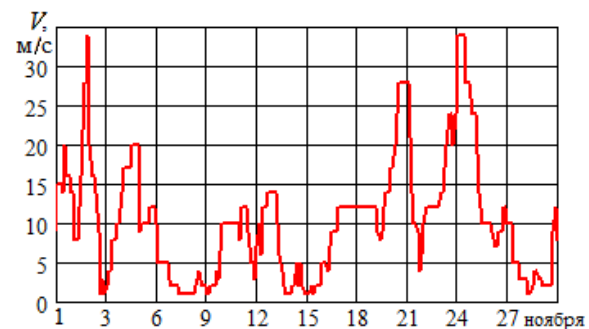


Рис. 2. Максимальные скорости ветра в Балтийске в ноябре 1981 г. по данным [10]

Скорость порывов ветра 30 м/с и более в Балтийске также была зафиксирована в следующие годы: 1983 – 32 м/с, 1993 – 34 м/с, 1999 – 32 м/с, 2004 – 30 м/с, 2015 – 30 м/с. Заметим, что в [1] приводится максимальное значение скорости ветра 28 м/с, хотя период наблюдения заканчивается 1985 годом.

2.2. Проверка достаточной длины ряда

Длина ряда максимальных годовых скоростей ветра в Балтийске, полученного в [10], $n = 42$. Найдем точечные оценки математического ожидания среднего квадратичного отклонения ряда скоростей по известным формулам (1):

$$Vs = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i = 26,2; \quad \sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - Vs)^2 = 3,2. \quad (1)$$

Погрешность выборочной средней определим по приближенной зависимости (2) из [11]:

$$\Delta V = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r(1)}{1-r(1)}} = 0,90, \quad (2)$$

где $r(1)$ – коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Относительную погрешность выборочного среднего рассчитаем по формуле (3):

$$\varepsilon = 100 \cdot \Delta V / V_s = 4,3\%. \quad (3)$$

Длину исследуемого ряда скоростей можно считать достаточной, так как относительная погрешность ε не превышает критическое значение для максимальных характеристик – 20% [12].

2.3. Проверка однородности ряда

Разобьем ряд на две части: $n_1 = 21$, $n_2 = 21$. Выборочные средние каждой части ряда (4):

$$V_{s1} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} V_i = 26,2 \text{ м/с};$$

$$V_{s2} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=n_1+1}^n V_i = 26,4 \text{ м/с}. \quad (4)$$

Исправленные выборочные дисперсии каждой части ряда:

$$D_1 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (V_i - V_{s1})^2 = 11,7;$$

$$D_2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=n_1+1}^n (V_i - V_{s2})^2 = 9,8. \quad (5)$$

Параметр критерия Фишера $F_s = D_1/D_2 = 1,18$. Критическое значение по F-распределению при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$: $F_{s_{кр}} = 2,12$ [11]. Так как $F_s < F_{s_{кр}}$, гипотеза о равенстве дисперсий не отвергается.

Рассчитаем средневзвешенную дисперсию формуле (6) из [11]:

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot D_1 + (n_2 - 1) \cdot D_2}{n - 2}} = 3,3. \quad (6)$$

Значение статистики Стьюдента t для проверки гипотезы о равенстве математических ожиданий найдем по (7) [11]:

$$t = \frac{|V_{s1} - V_{s2}|}{S} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} = 0,188. \quad (7)$$

Критическое значение по распределению Стьюдента $t_{кр} = 1,69$. Так как $t < t_{кр}$, гипотеза о математических ожиданий не отвергается. Можно считать исследуемый ряд однородным.

3. Максимальные расчетные скорости ветра

3.1. Построение теоретического распределения максимальных годовых скоростей ветра

Для расчета максимальных годовых скоростей ветра найдем их закон распределения. Как и в [8] полагаем, что они подчиняются закону Гумбеля с функцией распределения (8):

$$F(v) = \exp(-\exp(-\alpha(v - q))), \quad (8)$$

где q, α – параметры закона распределения.

Учитываем, что при конечной длине ряда n величины q, α в формуле (8) зависят от вспомогательных параметров y, σ_y (9) [11]:

$$\alpha = \sigma_y / \sigma; \quad q = V_s - y / \alpha. \quad (9)$$

При $n = 42$ находим в таблице из [11]: $y = 0,545$; $\sigma_y = 1,146$. Тогда по формуле (9) параметры распределения Гумбеля: $\alpha = 0,354$; $q = 24,75$.

Теоретическая вероятность превыш максимальной годовой скорости ветра, представленная на рис. 3, рассчитана по формуле (10):

$$P(v) = (1 - F(v)) \cdot 100\%. \quad (10)$$

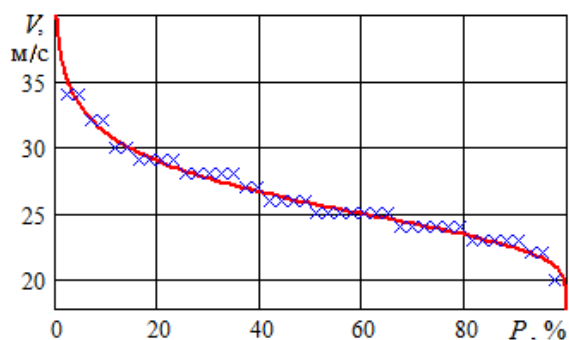


Рис. 3. Кривая обеспеченности максимальной годовой скорости ветра в Балтийске: точки – опытные данные [10], линия – результат расчета по (10)

В [10] приводятся данные измерений скорости ветра в м/с точностью до целых единиц. Поэтому на рис. 3 по несколько экспериментальных точек имеют одно значение скорости (например, 7 точек при $V = 25$ м/с) и отклоняются от теоретической кривой. Это чисто инструментальный эффект. Если бы измерения были выполнены с точностью до 0,1 м/с, то большинство точек лежали на теоретической кривой.

Период повторяемости максимальных годовых скоростей ветра (Return period), показанный на рис. 4, вычисляем, как в [8], по формуле (11):

$$T(v) = 1/(1 - F(v)). \quad (11)$$

Заметим, что приведенный в [8] график (штриховая линия на рис. 4) несколько отличается от значений, рассчитанных по формуле (11).

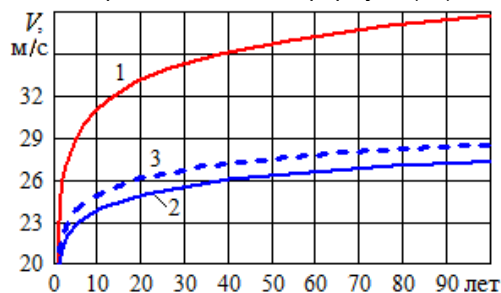


Рис. 4. Повторяемость максимальных годовых скоростей ветра по формуле (6): 1 – Балтийск; 2 – Дарс-Цингст; 3 - Дарс-Цингст в [8]

Таблица 2

Расчетные значения максимальной годовой скорости ветра в Балтийске

$P_k, \%$	0,5	1	2	5	10
$V_k, \text{ м/с}$	39,7	37,8	35,8	33,1	31,1

3.2. Расчетные значения максимальной скорости ветра заданной обеспеченности

Заключение

Для учета ветрового воздействия при проектировании зданий и сооружений береговой инфраструктуры требуются максимальные годовые расчетные значения скорости (порывы ветра) V_k заданной обеспеченности (вероятности превышения) P_k . Они находятся из уравнения (12):

Проведенный статистический анализ ряда максимальных годовых скоростей (порывов) ветра в Балтийске подтвердил его однородность по критериям Фишера и Стьюдента, а также достаточную длину для построения теоретического распределения.

$$P(V_k) = P_k. \tag{12}$$

В рассматриваемом случае уравнение (12) имеет аналитическое решение (13):

Данные измерений максимальных скоростей ветра удовлетворительно согласуются с результатами расчета по закону распределения Гумбеля. Отклонение экспериментальных точек от теоретической зависимости связано с инструментальным эффектом: измерения максимальной скорости ветра выполнены в м/с точностью до целых единиц.

$$V_k = q - \frac{1}{\alpha} \ln \left(- \ln \left(1 - \frac{P_k}{100} \right) \right). \tag{13}$$

где обеспеченность P_k задается в процентах, скорость V_k получается в м/с.

Построен график повторяемости максимальных годовых скоростей ветра в Балтийске. Примерно один раз в 100 лет скорость ветра может достигнуть 38 м/с. На побережье Дарс-Цингст (Германия) этот уровень ниже 29 м/с.

Результаты расчета по формуле (13) представлены в табл. 2.

Получено аналитическое выражение и рассчитана таблица значений максимальных годовых скоростей ветра в Балтийске заданной вероятности превышения. При обеспеченности 0,5 % расчетная скорость ветра составляет 39,7 м/с.

Литература

1. Тупикин С.Н. Сильные ветры Балтийского моря (анализ, статистика, типизация). Калининград: Изд-во Калининградского государственного университета, 1997. 96 с.
2. Наумова М. В Калининградской области устраняют последствия урагана. Вести, 29 ноября 2011 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=644757&cid=1>.
3. Подобед В.А. Математическое моделирование ветровых нагрузок на портовые порталные краны // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9, № 2. С. 318-331.
4. Alekhin V.N., Antipin A.A., Gorodilov S.N. Analysis of wind impacts on the high-rise building "Iset Tower". Applied Mechanics and Materials. 2013. V. 281. P. 639–644.
5. Сотникова О.А., Мурашова Л.В., Маленёв А.И. и др. Математическое моделирование векторного поля ветра при обтекании искусственных сооружений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2015. № 4. С. 22-30.
6. Наумов В.А. Пространственная форма цепи при воздействии течения и ветра на судно, стоящее на одном якорю // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4(38), Т.2. С. 191-195.
7. Soomere T. Extreme wind speeds and spatially uniform wind events in the Baltic Proper. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering. 2001. V. 7, No. 3. P.195–211.
8. Zhang W, Harff J, Schneider R. Analysis of 50-year wind data of the southern Baltic Sea for modelling coastal morphological evolution - a case study from the Darss-Zingst Peninsula. Oceanologia, 2011. V. 53, No. 1. P. 489-518.
9. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Инженерные изыскания в бассейне реки Преголи. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. 183 с.
10. ФГБУ ВНИИ гидрометеорологической информации. Специализированные массивы данных для климатических исследований [Электронный ресурс]. Режим доступа – по паролю: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 01.05.2018).
11. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Москва: Физматлит, 2006. 816 с.
12. Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчетов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 277 с.

References

1. Tupikin S.N. Sil'nye vetry Baltijskogo morya (analiz, statistika, tipizaciya) [Strong winds of the Baltic sea (analysis, statistics, typing)]. Kaliningrad: Kaliningrad State University Publ., 1997. 96 p.
2. Naumova M. (2011) V Kaliningradskoj oblasti ustranyayut posledstviya uragana [Eliminate the consequences of the hurricane in the Kaliningrad region]. Vesti, November 29. [Electronic resource]. URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=644757&cid=1> (date accessed: 01.05.2018).

3. Podobed V.A. (2006) Matematicheskoe modelirovanie vetrovyh nagruzok na portovye portal'nye krany [Mathematical modeling of wind loads on the port portal cranes]. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. V. 9, No. 2, pp. 318-331.
4. Alekhin V.N., Antipin A.A., Gorodilov S.N. (2013) Analysis of wind impacts on the high-rise building "Iset Tower". Applied Mechanics and Materials. V. 281, pp. 639-644.
5. Sotnikova O.A., Murashova L.V., Malenyov A.I. et al. (2015) Matematicheskoe modelirovanie vektornogo polya vet-ra pri obtekanii iskusstvennyh sooruzhenij [Mathematical modeling of vector fields of wind in the flow structures]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii. No. 4, pp. 22-30.
6. Naumov V.A. (2017) Prostranstvennaya forma cepi pri vozdeystvii techeniya i vetra na sudno, stoyashchee na odnom yakore [Spatial form of the chain when exposed to stream and wind on the ship, standing on one anchor]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. No. 4(38), V. 2, pp. 191-195.
7. Soomere T. (2001) Extreme wind speeds and spatially uniform wind events in the Baltic Proper. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering. V. 7, No. 3, pp.195-211.
8. Zhang W, Harff J, Schneider R. (2011) Analysis of 50-year wind data of the southern Baltic Sea for modelling coastal morphological evolution - a case study from the Darss-Zingst Peninsula. Oceanologia. V. 53, No. 1, pp. 489-518.
9. Naumov V.A., Ahmedova N.R. Inzhenernye izyskaniya v bassejne reki Pregoli [Engineering surveys in the basin of the Pregel River]. Kaliningrad: KGTU Publ., 2017. 183 p.
10. FGBU VNII gidrometeorologicheskoy informacii. Specializirovannye massivy dannyh dlya klimaticheskikh issledovanij [Research Institute of hydrometeorological information. Specialized data sets for climate research]. [Electronic resource]. Access mode (password): <http://meteo.ru/data> (date accessed: 01.05.2018).
11. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 816 p.
12. Rozhdestvenskij A.V., Ezhov A.V., Saharyuk A.V. Ocenka tochnosti gidrologicheskikh raschetov [Estimation of accuracy of hydrological calculations]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 277 p.

УДК 531:629.5

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ПОДЪЕМА ГРУЗА С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОГО КАНАТА

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

Борис Аркадьевич Альтшуль

доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: van-old@mail.ru

Аннотация

В морской индустрии широко используются различные канатно-тросовые системы для подъема груза из воды. Все большее распространение получает применение в них канатов из высокомолекулярного полиэтилена. Анализ результатов лабораторных испытаний позволил найти эмпирические параметры характеристики нагрузка-удлинение таких канатов. При использовании порабатанных канатов показатель нелинейности оказался в пределах 1,05-1,12. Получена безразмерная система уравнений динамики подъема груза из воды лебедкой с учетом отклонения каната от вертикали. Механическая система имеет три степени свободы. В рассматриваемой постановке задача имеет 8 критериев подобия, в том числе показатель степени нелинейной характеристики и начальный угол отклонения каната от вертикали. Задача решена численным методом. Исследовано влияние критериев подобия на динамику механической системы с тремя степенями свободы. Даже малое отклонение от линейной характеристики нагрузка-удлинение приводит к заметному уменьшению безразмерной величины поднятого каната и росту его относительного удлинения.

Ключевые слова: подъем груза, канат из высокомолекулярного полиэтилена, динамика, уравнения.

DYNAMICS OF A TERNARY LOAD LIFTING SYSTEM WITH THE USE OF A SYNTHETIC ROPE

Vladimir A. Naumov

DSc in Engineering, Professor, Head of the Department of Aquatic Resources and Water Management
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: van-old@mail.ru

Boris A. Altshul

DSc in Engineering, Professor at the Department of Higher Mathematics
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1
e-mail: van-old@mail.ru

Abstract

Various cable-rope systems are widely used to lift cargo from water in the maritime industry. The use of high molecular weight polyethylene ropes is becoming more common. Analysis of the laboratory test results allowed us to find empirical parameters of the stress-strain characteristics of such ropes. When ropes are used, the nonlinearity indicator turned out to be in the range of 1.05-1.12. A dimensionless system of equations for the dynamics of lifting the load from the water with a winch has been obtained, taking into account the deviation of the rope from the vertical. The mechanical system has three degrees of freedom. In this formulation, the problem has 8 similarity criteria, including the exponent of the nonlinear characteristic and the initial angle of the rope deflection from the vertical. The problem has been solved by the numerical method. The influence of the similarity criteria on the dynamics of the mechanical system with three degrees of freedom has been studied. Even a small deviation from the linear stress-strain characteristic leads to a noticeable decrease in the dimensionless value of the lifted rope and an increase in its relative elongation.

Key words: load lifting, high molecular weight polyethylene rope, dynamics, equations.

Введение

В морской индустрии широко используются различные канатно-тросовые системы для подъема груза из воды (см. [1-4] и библиографию в них). Все большее распространение получает применение в таких системах канатов из высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ) [5, 6]. Канаты ВМПЭ обладают высокой прочностью, имеют плотность ниже, чем у воды, удлинение значительно меньшее, чем у канатов из других синтетических материалов.

Доказано, что относительное удлинение канатов из полиамида, полистила, полипропилена зависит от нагрузки нелинейно, даже при небольшой ее величине [7]. В [3] было исследовано влияние критериев подобия на динамику подъема груза из воды с помощью канатов из указанных материалов. При этом возможное отклонение каната от вертикали не учитывалось, поэтому механическая система имела две степени свободы. В [4] была решена задача динамики системы с тремя степенями свободы с учетом начального отклонения каната от вертикали. Были использованы следующие обобщенные координаты (рис. 1): ψ – угол поворота барабана лебедки, ϕ – угол отклонения троса от вертикали, X – абсолютное растяжение троса. Но в [4] было сделано допущение, что зависимость силы натяжения от удлинения – линейная.

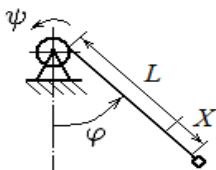


Рис. 1. Схема механической системы с тремя степенями свободы для подъема груза

1. Цель и задачи исследования

Цель статьи – разработка математической модели механической системы подъема груза с тремя степенями свободы с учетом отклонения от вертикали каната ВМПЭ.

Задачи исследования:

- расчет эмпирических параметров характеристики нагрузка-удлинение канатов ВМПЭ по результатам лабораторных испытаний;
- математическая постановка задачи динамики механической системы лебедка – канат – груз с тремя степенями свободы;
- решение численным методом поставленной задачи при различных значениях критериев подобия.

2. Характеристика нагрузка-удлинение канатов ВМПЭ

В [7] для канатов из полиамида, полипропилена и других синтетических материалов была получена эмпирическая зависимость (1):

$$\bar{F} = F/P = A \cdot (X/L_0)^s = A \cdot \varepsilon^s, \quad (2)$$

где ε – относительное удлинение каната; X – абсолютное удлинение; L_0 – исходная длина; F – сила, растягивающая канат; P – разрывное усилие; A, s – эмпирические параметры, зависящие от материала, типа и состояния каната. Для 3-рядных

крученых канатов из исследованных материалов значение s составило от 1,67 до 1,83.

В [8] были опубликованы результаты лабораторных исследований характеристики нагрузка-удлинение канатов ВМПЭ. На рис. 2 в качестве примера показана зависимость относительного удлинения 12-рядный плетеного каната ВМПЭ (Дупеета, Sk-75) диаметром 0,5 дюйма. Номинальное растяжение, указанное в техническом паспорте – 3,8%. В проведенных опытах разрывное усилие нового каната составило 1,47 кН при удлинении 7,2%.

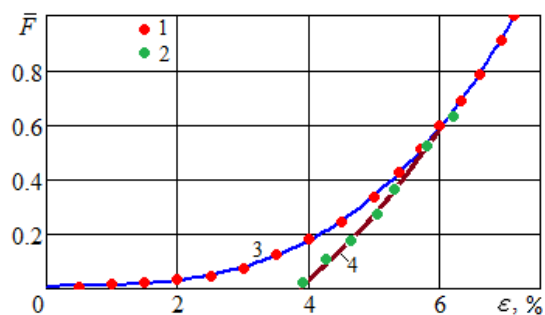


Рис. 2. Характеристика нагрузка-удлинение канатов ВМПЭ. Точки – опытные данные [8]: 1 – новые канаты, 2 – после циклической нагрузки. Линии – расчет по формуле (1): 3 – $s = 1,95$; 4 – $s = 1,1$

Результаты расчета по формуле (1) хорошо согласуются с экспериментальными данными по новым канатам при $s = 1,98$. При использовании поработавших канатов (после циклической нагрузки) показатель нелинейности оказался в пределах $s = 1,05-1,12$ (линия 4 на рис. 2).

3. Математическая постановка задачи

3.1. Система дифференциальных уравнений

Пусть масса груза равна m . Радиус барабана лебедки r_0 , осевой момент инерции J . Приложенный к барабану момент зависит от угловой скорости Ω по приближенной формуле (2):

$$M(\Omega) = M_0 - B\Omega, \quad (2)$$

где $M_0/B = \Omega^*$ – установившаяся угловая скорость барабана лебедки на холостом ходу.

Начальная угловая скорость барабана равна нулю. Начальная длина троса L_0 . Как в [3] полагаем, что массой троса и силой его гидродинамического сопротивления можно пренебречь.

Составляющие абсолютной скорости движения груза найдем по формулам (3)-(4):

$$U = \Omega \cdot r_0 - \dot{X} = \dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X}, \quad (3)$$

$$V = \Omega_1 \cdot L = \dot{\phi} \cdot (L_0 - \psi \cdot r_0 + X). \quad (4)$$

Составляющие силы гидродинамического сопротивления груза найдем по (5)-(6) [9]:

$$R_x = -a \cdot W \cdot (\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X}), \quad (5)$$

$$R_y = -a \cdot W \cdot \dot{\phi} \cdot (L_0 - \psi \cdot r_0 + X), \quad (6)$$

$$W = \sqrt{\dot{\phi}^2 \cdot (L_0 - \psi \cdot r_0 + X)^2 + (\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X})^2}.$$

где a – коэффициент гидродинамического сопротивления груза.

Как в [3], считаем, что кинетическая энергия механической системы, складывается из

кинетической энергии вращающегося барабана и движущегося со скоростью W груза (7):

$$T = J \frac{\dot{\psi}^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot m(1+k\lambda) \cdot (\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X})^2. \quad (7)$$

где λ – отношение плотностей воды и груза, k – коэффициент присоединенной массы груза, g – ускорение свободного падения.

Безразмерная система дифференциальных уравнений динамики механической системы (8)-(10) получена с помощью формализма Лагранжа:

$$\frac{du}{d\tau} = 1 - \omega + \gamma \cos \varphi + \alpha(\omega - u) - \delta \ell \omega_1^2 - \beta \left(\frac{x}{\ell}\right)^s, \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_1}{d\tau} = \frac{2\delta}{\ell} \omega_1(\omega - u) - \frac{\gamma}{\ell} \sin \varphi - \alpha \omega_1, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega_1, \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = 1 - \omega - K_y \left(\frac{x}{\ell}\right)^s, \quad \frac{d\psi}{d\tau} = \omega, \quad \frac{dx}{d\tau} = u, \quad (10)$$

$$\ell = \ell_0 - \psi + x.$$

где введены следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{K_x}{K_m} w, \quad \beta = K_y \frac{1+K_m}{K_m}, \quad \gamma = \frac{K_g}{K_m}, \quad \delta = \frac{K_\varphi}{K_m},$$

$$x = \frac{X}{r_0}, \quad \omega = \frac{\Omega}{\Omega^*}, \quad \tau = t \cdot \frac{B}{J}, \quad u = \frac{U}{\Omega^* r_0}, \quad \ell = \frac{L}{r_0}.$$

Постановка задачи Коши включает систему дифференциальных уравнений (8)-(10) и начальные условия (11)-(12):

$$u(0) = 0, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega_1(0) = 0, \quad (11)$$

$$x(0) = 0, \quad \psi(0) = 0, \quad \varphi(0) = \varphi_0. \quad (12)$$

3.2. Критерии подобия задачи

По (8)-(12) видно, что к критериями подобия, являются, как и в [4], $\ell_0, K_g, K_m, K_\varphi, K_x, K_y$ (13)-(14), φ_0 – начальный угол отклонения каната от вертикали, s – показатель нелинейности характеристики нагрузка-удлинение.

$$\ell_0 = \frac{L_0}{r_0}, \quad K_g = \frac{r_0 m g}{M_0} (1 - \lambda), \quad K_m = m \frac{r_0^2}{J}, \quad (13),$$

$$K_\varphi = m \frac{M_0 r_0^2}{B^2}, \quad K_x = a \frac{M_0 r_0^3}{B^2}, \quad K_y = \frac{A \cdot r_0}{M_0}. \quad (14)$$

В [3] отсутствует критерий K_φ , связанный с отклонением каната от вертикали, а так же φ_0 . Если в начальных условиях (12) положить $\varphi_0 = 0$, то получим задачу [3], как частный случай.

4. Результаты расчета

Поставленная задача (8)-(12) не имеет аналитического решения. Был использован численный метод в среде Mathcad. На рис. 3-6 представлены результаты расчета при следующем базовом наборе значений критериев подобия: $K_m=1,5; K_g=0,25; K_x=0,05; K_y=8; \ell_0=70; K_\varphi=2; \varphi_0 = 0,1745$ (соответствует 10°). На рис. 3-4 показано, как изменение величины s влияет на решение. Даже малое отклонение (на 5-8 %) от линейной характеристики приводит к заметному уменьшению безразмерной величины поднятого каната и росту его относительного удлинения (15):

$$\xi = 100\% \cdot x / \ell = 100\% \cdot x / (\ell_0 - \psi + x). \quad (15)$$

При этом возрастает и максимум относительного удлинения каната.

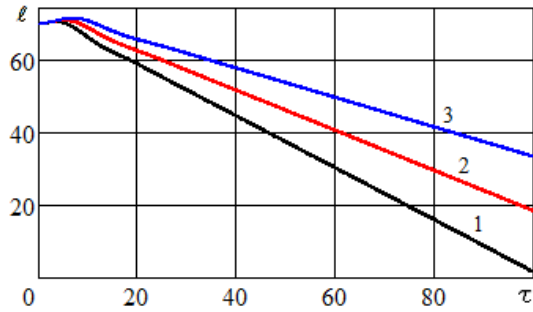


Рис. 3. Изменение безразмерной длины каната: 1 – $s=1$; 2 – $s=1,05$; 3 – $s=1,08$

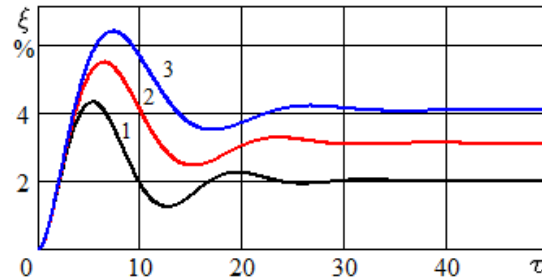


Рис. 4. Относительное удлинение каната: 1 – $s=1$; 2 – $s=1,05$; 3 – $s=1,08$

На рис. 5 показано изменение угла отклонения каната от вертикали при его различных начальных значениях. На рис. 6 – влияние критерия K_m на безразмерную угловую скорость барабана. Названный критерий характеризует соотношение между инерционностью барабана и груза.

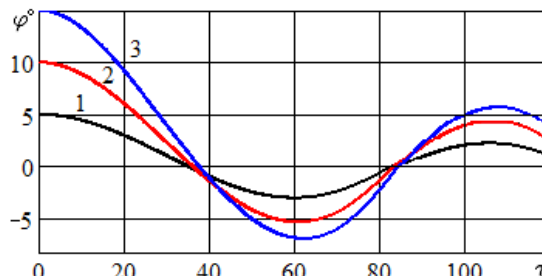


Рис. 5. Угол отклонения каната от вертикали: 1 – $\varphi_0 = 5^\circ$; 2 – $\varphi_0 = 10^\circ$; 3 – $\varphi_0 = 15^\circ$

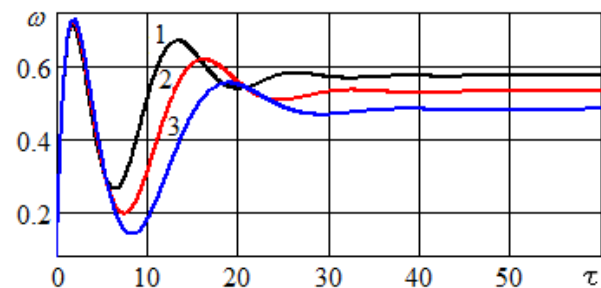


Рис. 6. Безразмерная угловая скорость барабана: 1 – $K_m=1$; 2 – $K_m=1,5$; 3 – $K_m=2,5$

Заключение

Анализ результатов лабораторных испытаний позволил найти эмпирические параметры

характеристики нагрузка-удлинение канатов ВМПЭ. При использовании поработавших канатов показатель нелинейности оказался в пределах $s = 1,05-1,12$

Получена безразмерная система уравнений динамики подъема груза из воды лебедкой с учетом отклонения каната от вертикали. Такая механическая система имеет три степени свободы. В рассматриваемой постановке задача имеет 8 критериев подобия, в том числе показатель степени

нелинейной характеристики s и начальный угол отклонения каната от вертикали.

Задача решена численным методом. Исследовано влияние критериев подобия на динамику механической системы с тремя степенями свободы. Даже малое отклонение от линейной характеристики нагрузка-удлинение приводит к заметному уменьшению безразмерной величины поднятого каната и росту его относительного удлинения.

Литература

1. Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А. и др. Математическое моделирование процесса выборки орудия рыболовства с помощью барабана фрикционного типа // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2013. № 4 (300). С. 32-36.
2. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*. 2017. V. 19, No 1, pp. 75-86.
3. Альтшуль Б.А., Наумов В.А. Динамика вертикального подъема груза из воды лебедкой с помощью синтетического каната // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. № 4(38), Т.2. С. 186-190.
4. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И., Ахмедов И.М. Динамика системы подъема груза // *Вестник Балтийского федерального университета. Серия: Физ.-мат. и технические науки*. 2017. № 4. С. 91-100.
5. Iannucci L., Pope D.J., Dalzell M. A Constitutive model for Dyneema UD composites. *Int. Conference on Composite Materials (ICCM-17)*. Edinburgh, UK, 27-31 July 2009 [Electronic resource]. URL: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Materials/> (дата обращения: 10.09.2018)
6. Наумов В.А., Ахмедов И.М. Расчет формы и усилий в канатах с учетом их эластичности // *Известия КГТУ*. 2016. № 40. С. 159-166.
7. Stenvers D., Chou R. Testing of high strength synthetic ropes. *Polymer Conference, Manchester, UK, July 2002* [Electronic resource]. URL: <http://www.samsonrope.com/Pages/TechnicalPapers.aspx> (дата обращения: 01.09.2018)
8. Наумов В.А. Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. № 3(37), Т.1. С. 158-162.

References

1. Nedostup A.A., Razhev A.O., Naumov V.A. et al (2013) Matematicheskoe modelirovanie protsesssa vyborki orudiya rybolovstva s pomoshch'yu barabana friktsionnogo tipa [Mathematic simulation of the process sample fishing tools from the drum friction type] *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. No 4 (300), pp. 32-36.
2. Haniszewski T. (2017) Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*. V. 19, No 1, pp. 75 86.
3. Al'tshul' B.A., Naumov V.A. (2017) Dinamika vertikal'nogo pod"ema gruzha iz vody lebedkoj s pomoshch'yu sinteticheskogo kanata [Dynamics of vertical cargo lift out of water with by the winch with synthetic rope]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. No 4(38), V.2, pp. 186-190.
4. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I., Ahmedov I.M. (2017) Dinamika sistemy pod"ema gruzha [Dynamics of the lifting system]. *Vestnik Bal-tijskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. No 4, pp. 91-100.
5. Iannucci L., Pope D.J., Dalzell M. (2009) A Constitutive model for Dyneema UD composites. *Int. Conference on Compo-site Materials (ICCM-17)*. Edinburgh, UK, 27-31 July 2009 [Electronic resource]. URL: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Materials/> (application date: 10.09.2018).
6. Naumov V.A., Ahmedov I.M. (2016) Raschet formy i usilij v kanatah s uchetom ih ehlastichnosti [Analysis of shape and effort in the ropes with regard to their elasticity]. *Izvestiya KGTU*. No 40, pp. 159-166.
7. Stenvers D., Chou R. (2002) Testing of high strength synthetic ropes. *Polymer Conference, Manchester, UK, July 2002* [Electronic resource]. URL: <http://www.samsonrope.com/Pages/TechnicalPapers.aspx> (application date: 01.09.2018).
8. Naumov V.A. (2017) Sily gidrodinamicheskogo soprotivleniya gibkih svyazej buksiruemyh podvodnyh ob"ektov [Hydrodynamic drag forces of flexible cables of towed underwater objects]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. No 3(37), V.1, pp. 158-162.

УДК 629.123

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ

Сергей Сергеевич Мойсеенко

д.п.н., к.т.н., профессор

Калининградский государственный технический университет

236022, Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

Евгений Олегович Мороз

аспирант направления подготовки «Эксплуатация водного транспорта судовождения»

Калининградский государственный технический университет

236022, Калининград, Советский пр., 1

e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные вопросы оптимизации системы транспортного обслуживания (СТО) рыболовного флота (РФ) в районах промысла, СТОРФ определена как совокупность транспортных средств, перегрузочного оборудования, технологий погрузо-разгрузочных работ, технологий складирования и транспортировки, методов и моделей оптимальной организации процессов обслуживания, Система обслуживания флота на промысле имеет многоцелевой характер и в морское предприятие вовлекается большое число материально-технических и финансовых ресурсов, значительное число юридических и физических лиц, что предопределяет сложность управления такой системой. Анализ процессов обслуживания флота на промысле и существующей практики управления показал, что наиболее эффективное управление процессом обслуживания рыболовного флота на промысле обеспечивает проектный подход. Представлен комплекс моделей и методов оптимизации СТОРФ. Определены критерии эффективности, безопасности и качества. Представлена структурная схема управления качеством обслуживания флота и транспортировки рыбной продукции в порты. Приведен численный пример решения задачи очередности обслуживания рыболовных судов на основе использования методов динамического программирования. Оптимизация системы позволяет существенно повысить эффективность работы рыболовных и транспортных судов.

Ключевые слова: рыболовные суда, транспортное обслуживание, математические модели, оптимизация системы обслуживания, эффективность

OPTIMIZATION OF THE TRANSPORT SERVICE SYSTEM OF FISHING VESSELS

Sergey S. Moysenko

DSc in Education, PhD in Engineering, Professor

Kaliningrad State Technical University

236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

Evgeniy O. Moroz

Postgraduate Student

Kaliningrad State Technical University

236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1

e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

Abstract

The article deals with topical issues of optimizing the transport service system (TSS) of the fishing fleet (FF) in the fishing areas, TSSFF is defined as a set of vehicles, handling equipment, loading and unloading technology, storage and transportation technologies, methods and models of the most suitable organization of the service processes. The fleet service system in fishery has a multi-purpose character, and a marine enterprise involves a large number of logistical and financial resources, a significant number of businesses and individuals, which determines the complexity of managing such a system. Analysis of fleet maintenance processes in fishery and existing management practices has shown that the project approach provides the most efficient management of the process of servicing the fishing fleet in fishery. A complex of models and methods for optimization of TSSFF has been presented. Criteria for effectiveness, safety and quality have been specified. A block diagram of the quality management of the fleet and transportation of fish products to ports has been presented. A numerical example of solving the problem of priority of servicing fishing vessels based on the use of dynamic programming methods has been given. Optimization of the system can significantly improve efficiency of fishing and transport vessels.

Key words: fishing vessels, transport service, mathematical models, service system optimization, efficiency

Эффективность работы рыбодобывающего флота во многом зависит от уровня организации транспортного обслуживания судов в районах промысла. Транспортные услуги включают:

- доставку на промысел технического и технологического снабжения, продуктов питания, товаров для обеспечения жизнедеятельности экипажей судов, топлива, питьевой воды и т.д.;

- выгрузку готовой рыбной продукции с рыболовных судов и доставку ее в порты назначения, а также доставку в порты пустых контейнеров, отработанных масел, других товаров, доставку в порт пассажиров (если потребуется).

Задержки с доставкой на промысел снабжения и вывозом рыбной продукции с промысла в порт влекут за собой простой рыболовных судов, снижение объемов добычи и производства продукции, снижение эффективности работы флота в целом. В свою очередь, эффективность работы транспортных судов зависит от уровня организации системы транспортного обслуживания (СТО) рыболовного флота. В этой связи задача оптимизации организации и управления СТО является актуальной.

СТО рыболовного флота может быть определена как совокупность транспортных средств, перегрузочного оборудования, технологий погрузо-разгрузочных работ, технологий складирования и транспортировки, методов и моделей оптимальной организации процессов обслуживания, административно-правовых модулей, информационно-аналитического модуля, модулей обеспечения безопасности и качества, модулей управления реализацией проекта обслуживания флота в районах промысла. На рисунке 1 представлена структурная модель СТО рыболовного флота, которая включает следующие основные блоки, обеспечивающие функционирование системы:

- организации и управления процессами обслуживания;

- транспортные и рыболовные суда;

- технологии и техники погрузо-разгрузочных работ (ПРР) в портах и море;

- проектирования и планирования СТО для конкретных районов промысла, рыболовных судов, времени года (сезона), климатических условий, социальных, правовых и политических условий;

- научного, методического и информационного обеспечения, включающее методы и модели оптимизации проектных и управленческих решений, методики и компьютерные программы решения задач, связанных с оптимизацией организации работы СТО и обеспечением безопасности, информацию о состоянии объекта управления и внешней среды и т.д.

Рассмотренные блоки СТО функционируют в тесной взаимосвязи и обеспечивают рациональную

организацию процессов транспортного обслуживания рыболовного флота непосредственно в районах промысла, что связано с различного рода рисками. Объект рыбного промысла по своей природе подвижен, условия среды отличаются сезонностью и «агрессивностью» (гидрометеорологические условия), погрузо-разгрузочные работы в основном производятся в открытом море/океане, режим морских пространств регламентируется международным морским правом – все это определяет специфику промысла и должно учитываться при проектировании и организации СТО рыболовного флота. В работах [3, 5] рассматривались вопросы проектирования транспортно-логистической системы транспортного обслуживания (ТЛСО) рыболовного флота в океаническом рыболовстве. Однако в этих работах вопросы оптимизации носят лишь постановочный характер

Система обслуживания флота на промысле имеет многоцелевой характер и в само морское предприятие вовлекается большое число материально-технических и финансовых ресурсов, значительное число юридических и физических лиц, что предопределяет сложность управления такой системой. Анализ процессов обслуживания флота на промысле и существующей практики управления показал, что наиболее эффективное управление процессом обслуживания рыболовного флота на промысле обеспечивает проектный подход.

Основные принципы проектирования – это принципы оптимальности, вариативности и адаптивности, что особенно важно в условиях динамичности процессов промысла. Выполнение принципов оптимальности обеспечивается комплексом оптимизационных моделей и эвристических приемов, а принципы вариативности и адаптивности предполагают возможность оперативного внесения корректирующих элементов в СТО.

Рассмотрим последовательность этапов и операций проектирования СТО рыболовного флота на следующем примере.

Предположим, рыболовные суда рассредоточены в районе промысла и образуют несколько отрядов по 5-7 судов, расстояния между подрайонами дислокации судов составляют от 50-ти до 250-ти миль. Капитаны судов информируют судовладельцев о месте дислокации, количестве топлива и воды на борту, количестве груза рыбной продукции и тары на борту, суточном вылове и темпах набора груза. Кроме того, с судов поступают (по необходимости) заявки на технико-технологическое снабжение, провизию, топливо, ГСМ, воду, а также сведения о сроках набора груза и выгрузки рыбной продукции (указывается ассортимент и количество, грузовой план).

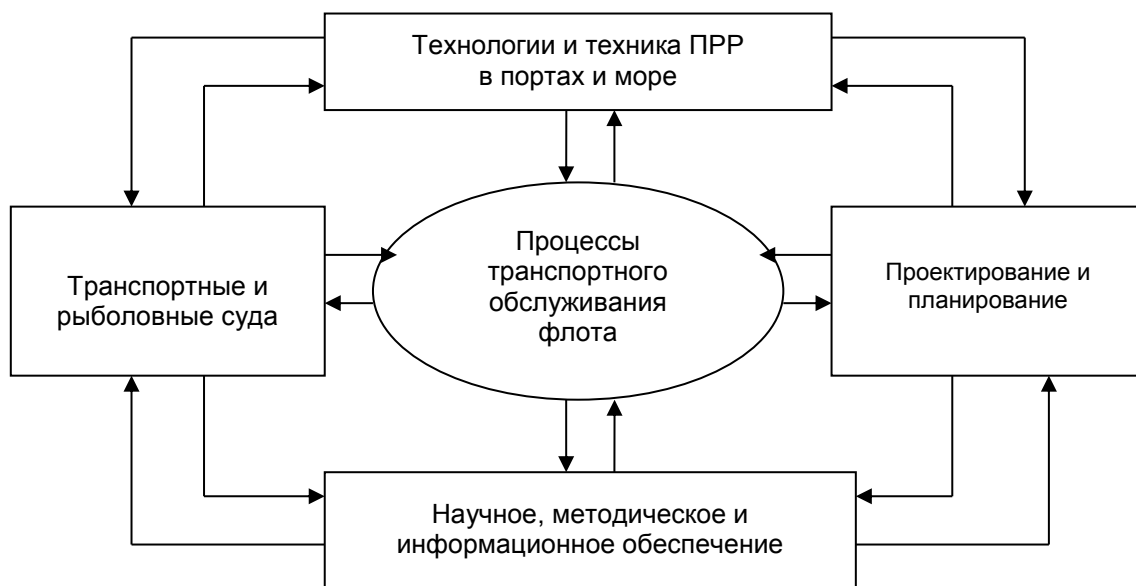


Рис. 1. Структурная модель системы транспортного обслуживания флота

Судовладельцы, анализируют полученную от судов информацию и принимают решение в части организации выгрузки рыбной продукции и снабжения судов. Возможны два основных варианта: 1) направить судно/суда в порт/порты; 2) организовать обслуживание судов непосредственно на промысле. В случае первого варианта действий судовладелец ищет покупателя рыбной продукции и направляет судно в порт по согласованию с покупателем. В случае второго варианта действий судовладельцу требуется или зафрахтовать судно или обратиться в транспортно-экспедиторскую компанию, которая специализируется на организации вывоза рыбной продукции с промысла и доставке грузов снабжения на промысел. Как правило, наиболее эффективный вариант – это вариант кооперации, т.е. когда транспортно-экспедиторская компания формирует портфель заказов на услуги и организует выполнение заказов от нескольких судовладельцев. Эта же компания может специализироваться и на организации сбыта рыбной продукции.

Для обеспечения эффективности и качества обслуживания рыболовных судов на промысле необходимо разработать проект СТО рыболовных судов. Исходными данными для проектирования являются:

- число и типы судов, их дислокация; количество груза на борту и темпы набора груза;
- грузовые планы и ассортимент груза;
- количество и номенклатура снабжения, которое необходимо доставить на промысел;
- сроки отгрузки рыбной продукции и доставки снабжения;
- порты назначения (доставки груза); прогностические оценки гидрометеорологических условий в районе промысла; коммерческие условия договора на обслуживание и др.

Основные этапы разработки проектов СТО рыболовного флота [3] включают:

- 1) формирование портфеля заказов на обслуживание флота;
- 2) проектирование ТЛСО рыболовного флота;
- 3) оптимизацию выбора типов и количества судов;
- 4) оптимизацию маршрутов и очередности обслуживания; оптимизацию процессов обработки рыболовных судов транспортными судами;
- 5) оформление проекта (корректировка взаимодействия модулей в смысле внутренней логики и связей, уточнение методов учета вероятностных факторов, влияющих на транспортные процессы);
- 6) расчет стоимости и эффективности проекта, выбор лучшего (в случае рассмотрения альтернативных вариантов);
- 7) разработку сетевой модели реализации ТЛСО флота;
- 8) расчет критического пути по критериям времени и стоимости; анализ сетевой модели и ее оптимизация;
- 9) разработку рабочего плана-графика выполнения проекта, подбор исполнителей;
- 10) определение управляемых и неуправляемых переменных, критериев и точек контроля качества выполнения операций, качества и безопасности перевозок;
- 11) обучение и инструктаж исполнителей проекта.

Анализ содержательной составляющей алгоритма проектирования позволяет определить основные задачи оптимизации проектных и управленческих решений. Структура комплекса задач, методы их решения и критерии приведена на рисунке 2. Оптимизация СТО осуществляется по критериям расстояний (маршрут обслуживания судов), затрат времени на обслуживание судна/судов, минимизации транспортных затрат, безопасности и минимизации рисков, надежности и сохранности груза. Все задачи комплекса системно взаимосвязаны и ориентированы на достижение главной цели – повышение эффективности работы флота.

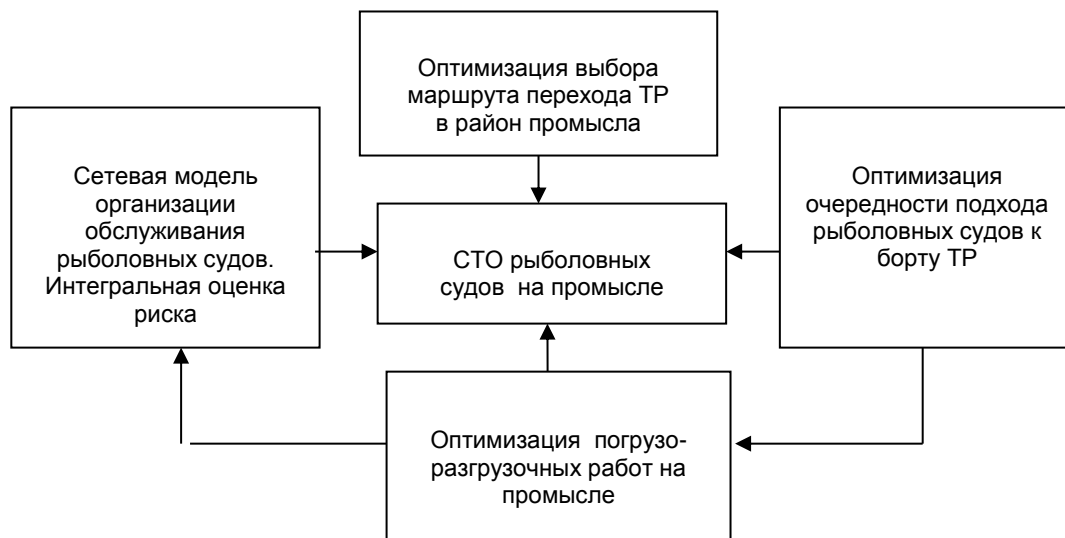


Рис. 2. Структура комплекса задач оптимизации транспортного обслуживания рыболовных судов на промысле

Важным этапом оптимизации СТО рыболовного флота является выполнение анализа информации по районам плавания и промысла, о портах, грузе, гидрометеорологических условиях и т.п. Анализ выполняется с целью определения потенциально возможных опасностей, а также для их учета при выборе типа судов и альтернативных маршрутов перехода в районы промысла, выбора технологий погрузо-разгрузочных работ (ПРР) и т.п. Выполнение такого анализа осуществляется разработчиками проекта с привлечением экспертов. Для оценки возникновения потенциальных опасностей определяются факторы риска и при наличии представительной статистики рассчитываются вероятностные оценки риска [7, 8, 9, 10].

Выбор типа судна (транспортного рефрижератора) осуществляется методом рассмотрения и анализа нескольких альтернативных вариантов по критериям технического состояния, стоимости (ставки фрахта или аренды на условиях тайм-чартера), скорости, расхода топлива, транспортных характеристик судна

и груза [2]. Задача выбора маршрута перехода транспортного рефрижератора в район промысла решается на основе анализа альтернативных вариантов маршрута и прогноза гидрометеорологических условий, направления ветров и течений. В целях оценки того или иного маршрута по критериям безопасности целесообразно выполнить расчет прогностических оценок поведения судна в экстремальных условиях плавания, что позволяет на раннем этапе оценить вероятность наступления чрезвычайных ситуаций. Пример такого расчета приведен в работах [4, 11].

Оптимизация очередности подхода рыболовных судов к борту ТР выполняется с использованием метода динамического программирования [1]. Рассмотрим

математическую постановку задачи и алгоритм ее решения.

Рыболовные суда располагаются в некоторой последовательности 1,2,3,..., N. Каждое очередное судно совершает переход, выгружается, после чего приступает к промыслу. Схематично весь цикл, совершаемый судном, изображен на рисунке 3

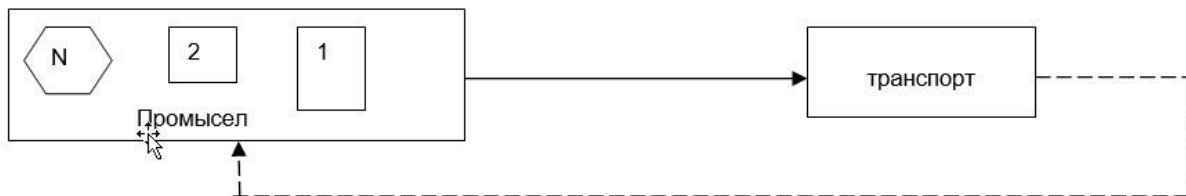


Рисунок 3. Цикл системы обслуживания рыболовных судов транспортным рефрижератором

Необходимо установить такой порядок обработки судов, чтобы время простоя причала транспорта, простоя судов в ожидании обработки, суммарное время обработки всей группы минимизировалось.

Обозначим через t_i время перехода i -го добывающего судна к плавбазе, через τ - время обработки i -го судна плавбазой, а через x_L – время простоя причала плавбазы в ожидании подхода под обработку очередного судна.

Имеют место следующие рекуррентные соотношения:

$$X_1=t_1;$$

$$X_2=\max(t_1+t_2-\tau_1-x_1,0);$$

$$X_1+X_2=\max(t_1+t_2-\tau_1, t_1);$$

$$X_3 = \max\left(\sum_{i=1}^3 t_i - \sum_{i=1}^2 \tau_i, 0\right);$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = \max\left(\sum_{i=1}^3 t_i - \sum_{i=1}^3 \tau_i, \sum_{i=1}^2 t_i - \tau_i, t_1\right);$$

и далее по индукции

$$\sum_{i=1}^n X_i = \max, K_n$$

где (1)

$$K_m = \sum_{i=1}^m t_i - \sum_{i=1}^{m-1} \tau_i.$$

Требуется найти такую перестановку судов, которая бы минимизировала выражение (1). Задача решается методом динамического программирования.

Пусть $\varphi(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2, \dots, t_n, \tau, T)$ – время, необходимое для совершения полного цикла n судами при условии, что обработка начинается на T единиц времени позже начала перехода i -го добывающего судна к ТР, τ - время, необходимое для перехода i -го судна к ТР и его обработки при оптимальной перестановке.

В случае, если переход к обработке начинаются с i -го судна, получаем функциональное уравнение

$$\varphi(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2, \dots, t_n, \tau, T) = \min[t_1 + \varphi(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2, \dots, 0, 0, \dots, t_n, \tau_n, t_1 + \max(T - t_1, 0))]. \quad (2)$$

В выражении (2) на месте пары (t_1, τ_1) стоит пара $(0,0)$. Из выражения (2) оптимальную перестановку получаем, поменяв местами два судна, т. е. к ТР идет сначала i -е, а затем j -е судно. Имеем:

$$\varphi(t_1, \tau_1, t_2, \tau_2, \dots, t_n, \tau, T) = t_i + t_j + \varphi(t_1, \tau_1, \dots, 0, 0, \dots, t_n, \tau_n; T_{ij}), \quad (3)$$

где

$$T_{ij} = \tau_i + \max[\tau_j + \max(T - t_i, 0) - t_j, 0] = \tau_j + t_i - t_j + \max[\max(T - t_i, 0), t_j - \tau_j] = \tau_j - \tau_i - t_i + \max[T - t_i, t_j - \tau_i, 0] = \tau_j - \tau_i - t_i + \max[T, t_i + t_j - \tau_i, t_j] = \tau_j + \tau_i - t_j - t_i + \max[t_i, \max[t_i + t_j - \tau_i, t_j]]. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при

$$\max[t_i + t_j - \tau_i, t_i] < \max[t_i + t_j - \tau_j, t_j] \quad (5)$$

имеет смысл i -е и j -е судно поменять местами. Перестановка целесообразна, если

$$\min(\tau_i, t_i) > \min(\tau_j, t_j)$$

(6)

Выражение (6) позволяет определить оптимальную перестановку судов по следующему алгоритму:

- получить информацию о состоянии добывающих судов, заполнить таблицу 1;
- определить перечень рыболовных судов, подлежащих обработке;
- по данным таблицы 1 определить значение параметров t_i и τ_i , занести в таблицу 2;
- отыскать среди значений t_i и τ_i наименьшее;
- если наименьшим окажется одно из значений t_i , то соответствующее судно первым начинает переход к ТР;
- если таковым окажется τ_i , соответствующее судно ставится последним;
- вычеркнуть из таблицы 2 оба значения t_i и τ_i ;
- повторить этот процесс с $(2m-2)$ оставшимися величинами;
- в случае нескольких минимальных значений для определенности выбрать судно с меньшим номером очереди; если $t_i = \tau_i$, упорядочить суда по значению t_i .
- рассчитать график обработки (таблица 3).

Таблица 1.

Состояние добывающих судов

№ п/п	Бортовой номер судна N	Тип судна	Координаты		Расстояние до ПБ S _i , миль	Скорость хода V _i , уз	Улов Q, т
			Широта φ _i	Долгота λ _i			
1	N ₁	РС	φ ₁	λ ₁	S ₁	V ₁	Q ₁
2	N ₂	СРТ	φ ₂	λ ₂	S ₂	V ₂	Q ₂
.
.
.
n	N _n	...	φ _n	λ _n	S _n	V _n	Q _n

Таблица 2

Значение параметров t_i и τ_i.

l	Бортовой номер	t _i	τ _i
1	N ₁	T ₁	τ ₁
2	N ₂	T ₂	τ ₂
.	.	.	.
.	.	.	.
M	N _m	t _m	τ _m

Таблица 3

График обработки рыболовных судов

№ очереди	Бортовой номер судна N _i	Улов Q, т	Время обработки		Время работы причала τ _i
			Начало T _{ни}	Окончание T _{ки}	
1	N ₁	Q ₁	T _{н1}	T _{к1}	τ ₁
2	N ₂	Q ₂	T _{н2}	T _{к2}	τ ₂
.
.
M	N _m	Q _m	T _{нm}	T _{км}	τ _m

Рассмотрим практический пример решения задачи.

Допустим, в Баренцевом море работает ТР с 8 рыболовными судами. Промысловая

обстановка относительно стабильная. На начало периода состояние группы судов определено параметрами, приведенными в таблице 4

Таблица 4

Состояние и диспозиция рыболовных судов

№ п/п	Бортовой номер	Тип судна	Координаты		Расстояние до ПР S, миль	Скорость хода V, уз	Улов Q, т
			Широта φ	Долгота λ			
1	1	РС	φ ₁	λ ₁	7	7	5
2	2	СРТ	φ ₂	λ ₂	10	9	10
3	3	МРТ-Р	φ ₃	λ ₃	5	10	7
4	4	СРТ-Р	φ ₄	λ ₄	12	10	15
5	5	РС	φ ₅	λ ₅	5	7	8
6	6	СРТ	φ ₆	λ ₆	6	10	12

Определяем параметры t_i и τ_i для каждого добывающего судна и составим таблицу 5

Таблица 5

Исходные данные и шаги решения

i	T _i , ч	τ _i , ч
1	2	3
1	1	0,7
2	1,1	1,0
3	0,5	0,9
4	1,2	1,1
5	0,7	1,2
6	0,6	1,0
На первом шаге имеем		
3	0,5	0,9
1	1,0	0,7
2	1,1	1,0
4	1,2	1,1
5	0,7	1,2
6	0,6	1,0
На втором шаге имеем		

3	0,5	0,9
6	0,6	1,0
1	1,0	0,7
2	1,1	1,0
4	1,2	1,1
5	0,7	1,2

Следуя и далее предписанию алгоритма, получаем оптимальную очередность подхода судов под обработку (таблица 6)

Таблица 6

Оптимальная очередность подхода судов к борту ТР

i	t _i	T _i
3	0,5	0,9
6	0,6	1,0
5	0,7	1,2
4	1,2	1,1
2	1,1	1,0
1	1,0	0,7

Рассчитываем график обработки судов (таблица 7) и доводим до сведения капита-нов.

Таблица 7

График подхода судов к борту ТР

№ очереди	Бортовой номер судна N _i	Улов Q, т	Время обработки, ч		Время работы причала, ч
			Начало T _{ни}	Окончание T _{ки}	
1	3	7	00-00	00-54	0,9
2	6	12	00-54	01-54	1,0
3	5	8	01-54	03-06	1,2
4	4	15	03-06	04-12	1,1
5	2	10	04-12	05-12	1,0
6	1	5	05-12	05-54	0,7

Анализ чувствительности решения позволяет определить пределы изменения параметров, в которых найденная стратегия обработки судов остается оптимальной. Так, в нашем примере увеличение груза рыбной продукции на 20% не изменяет очередности, но график обработки требует корректировки по времени. Следует отметить, что процесс промысла носит вероятностный характер, однако, предлагаемый метод позволяет находить приближенные стратегии.

При моделировании процессов одновременного обслуживания (ПРП) двух судов учитываются возможные схемы швартовки их к борту ТР, расположение груза на рыболовном судне и емкости трюмов на ТР. В качестве критерия оптимальности принимается минимизация времени обслуживания всей группы рыболовных судов, а это обеспечивается производительностью погрузо-разгрузочных работ. Высокая производительность, при прочих равных условиях, достигается за счет организации одновременной (параллельным выполнением работ) работы на несколько люков/трюмов. Например, на крупнотоннажных транспортных рефрижераторах возможна одновременная погрузка на четыре люка/трюма. С этой целью разрабатывается эвристическая имитационная модель, в которой рассматриваются схемы швартовки рыболовных судов к борту ТР, при которых обеспечивается равномерность одновременной загрузки трюмов [5].

Для эффективного управления погрузо-разгрузочными работами необходимо разработать план выполнения всего комплекса операций, в котором бы были увязаны цели и средства их достижения. С этой целью разрабатывается сетевая модель выполнения всего комплекса работ по транспортному обслуживанию рыболовных судов. В

нашем случае разрабатывается сетевая модель, в которой в логической последовательности увязываются все виды работ и операций, необходимых для выполнения проекта, и средств, обеспечивающих выполнение всего комплекса работ. Расчет критического пути позволяет определить максимальные сроки (или стоимость) проекта, определить резервы и возможности использования этих резервов для сокращения продолжительности (стоимости) критического пути [2, 5, 6].

Проект СТО рыболовного флота должен удовлетворять условиям безопасности. С этой целью выполняется расчет интегральной оценки риска возникновения аварий/ЧС и допустимой величины риска. Для расчета используется методика, предложенная в работе [7]. Интегральная оценка риска включает риски аварий, отказов машин и механизмов, воздействия сил природы, гибели судов и потери груза. Уровень интегральной оценки риска сравнивается с допустимой оценкой риска. Предлагается сравнивать расчетную цену риска с величиной ожидаемой прибыли. В случае если риск жизни человека меньше $1 \cdot 10^{-6}$, а цена риска меньше ожидаемой прибыли, то проект можно принять. В случае, если риск выше допустимого, то разрабатываются организационно-технические мероприятия по снижению уровня рисков и определяется оценка их эффективности. Выполняется расчет цены риска и принимается решение о реализации проекта СТО.

Задача контроля качества обслуживания и уровня безопасности предполагает выполнение следующих процедур:

- определить параметры контролируемых процессов/операций;
- определить/разработать критерии качества;

- определить факторы риска и методы оценки риска;
- выбрать/разработать методы контроля;
- определить точки контроля и периодичность контроля;
- персонафицировать ответственность осуществления контроля;
- определить процедуры и методы принятия решений;
- разработать набор типовых подстроечных мероприятий и рекомендаций по их применению в процессе управления качеством обслуживания флота.

Для определения критериев качества/безопасности необходимо, в первую очередь, дать их классификационные характеристики. Предлагается ввести в практику следующие классификационные группы критериев: технико-технологические; экономические; административно-правовые; организационные; образовательные/квалификационные.

Технико-технологические критерии/стандарты определены Правилами классификации и постройки морских судов (правила Регистра России), правилами технической эксплуатации, правилами перевозки грузов, международными конвенциями (СОЛАС, О грузовой марке, МАРПОЛ, МППСС и др.). Задача проектировщиков систем управления качеством заключается в системном упорядочении этих критериев и разработке методики их применения в подсистеме управления качеством.

Экономическая группа критериев включает критерии эффективности грузоперевозок/функционирования ТЛСО [11]. Так, например, значения целевых оптимизирующих функций принимаются в качестве критериев оптимальности, а после определения доверительных интервалов эти значения можно принимать как критерии качества. Логика здесь проста. Предположим, значение целевой функции транспортных издержек равно 200 ед/тн, доверительный интервал +/- 20 ед, следовательно, если нами получен результат, находящийся в этом диапазоне, то по экономическому блоку СТО работала качественно, поскольку такой результат не мог быть достигнут в случае не качественного обслуживания судов.

Административно-правовые критерии – это, прежде всего, правовые нормы, стандарты оформления документации, должностные обязанности и права, устав предприятия, порядок ведения и предоставления отчетности и др.

Группа организационных критериев включает стандарты разработки технологических карт и сами

карты, целевые функции оптимизационных задач организации погрузо-разгрузочных операций, правила логистики, нормативы МОТ и комплектования экипажей морских судов и др.

Группа образовательных критериев – это образовательные стандарты, квалификационные характеристики, критерии подбора и расстановки кадров, требования Международной Конвенции по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты и др.

Управление качеством транспортного обслуживания рыболовного флота связано, в первую очередь, обеспечивается разработкой оптимального проекта самой СТО, поскольку это, как правило, проекты «штучные», выполняются индивидуально для каждого портфеля заказов. Это объясняется как спецификой самих заказов, так и вероятностным характером промысла, подвижностью объема промысла, сезонностью, конъюнктурой рынка и т.д. Проектирование СТО флота и системы управления качеством обслуживания выполняются в рамках одной системы.

СТО рыболовного флота это вариативная система, что предполагает возможность гибкой адаптации в изменяющихся условиях промысла. Так, например, на момент подхода к району промысла дислокация судов существенно изменилась, наблюдаются изменения и в промысловой обстановке, в темпах набора судами груза. В этом случае проектировщики отдела логистики транспортно-экспедиторской компании, или логистического центра (исполнитель заказа) оперативно выполняет комплекс расчетов по корректировке проекта и планов его реализации. Оперативность реагирования на изменения условий обеспечивается использованием информационных технологий, и программного обеспечения для решения оптимизационных задач. Более того, оперативное управление может быть обеспечено начальником экспедиции или флагманом отряда, а так же капитаном транспортного судна. Последнее предполагает, что начальники экспедиций, флагманы, капитаны судов имеют соответствующую профессиональную подготовку в области транспортной логистики и оптимального управления флотом.

В заключении отметим, что по оценкам экспертов использование проектного подхода к управлению транспортным обслуживанием флота на промысле позволяет существенно повысить эффективность рыболовства, уровень безопасности и качества транспортных услуг.

Литература

1. Акофф Р., Сасиени М. Основы исследования операций/Р. Акофф, М. Сасиени. М.: Мир, 1971. 543 с.
2. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Методология проектирования транспортных процессов и систем: Монография/С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Калининград. Изд-во БГАРФ, 2014. 218 с.
3. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Рыболовственная логистика. Монография/ С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Калининград. Изд-во БГАРФ, 2015. 174 с.
4. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Безопасность морских грузоперевозок. Монография/ С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011. 398 с.
5. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Organization of fishing fleet transport service at ocean fishing grounds (статья)/ С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Proceedings of the Hamburg International Conference on Logistic (HTCL/ 2011) Maritime logistics in the global economy/ Current trend and approaches/ Hamburg/ Germany/ September 2011. Pp. 193-203.
6. Мухин В.И. Исследование систем управления. Анализ и синтез систем управления/ В.И. Мухин. М.: «Экзамен», 2002. 383 с.
7. Фаустова О.Г. Методика оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в мультимодальных перевозках / О.Г. Фаустова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2014. № 1, С. 109-116.
8. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. Elsevier 2010. 508 p.
9. Jin D., A model of fishing vessel accident probability / D. Jin., H. L. Kite-Powell, E.Thunberg, .R. Solow & W.K Talley.// Journal of Safety Research, 2002, 33: Pp. 497-510 .
10. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties / L. Kobyliński // Trans Nav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2009, 3 (4). Pp. 443-448.
11. Moysenko S.S./ Meyler L.E. Prognostic Estimation of Ship Stability in Extreme Navigation Conditions/ S.S/ Moysenko, L.E/ Meyler - Proceedings of the International Symposium TransNav 2013. Marine navigation and safety of sea transportation. Maritime Transport and Shipping, Gdynia, Poland, June 2013. Pp. 271-276.

References

1. Akoff R., Sasieni M. Osnovy issledovaniya operacij. R. Akoff, M. Sasieni. M.: Mir, 1971. 543 p.
2. Moysenko S.S., Mejler L.E. Metodologiya proektirovaniya transportnyh processov i sistem: Monografiya. S.S. Moysenko, L.E. Mejler. Kaliningrad. Izd-vo BGARF, 2014. 218 p.
3. Moysenko S.S., Mejler L.E. Rybopromyshlennaya logistika. Monografiya. S.S. Moysenko, L.E. Mejler. Kaliningrad. Izd-vo BGARF, 2015. 174 p.
4. Moysenko S.S., Mejler L.E. Bezopasnost' morskikh gruzoperevozok. Monografiya. S.S. Moysenko, L.E. Mejler. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2011. 398 p.
5. Moysenko S.S., Mejler L.E. Organization of fishing fleet transport service at ocean fishing grounds (stat'ya)/ S.S. Moysenko, L.E. Mejler. Proceedings of the Hamburg International Conference on Logistic (HTCL/ 2011) Maritime logistics in the global economy. Current trend and approaches. Hamburg. Germany. September 2011. Pp. 193-203.
6. Muhin V.I. Issledovanie sistem upravleniya. Analiz i sintez sistem upravleniya. V.I. Muhin. M.: «EHkzamen», 2002. 383 p.
7. Faustova O.G. Metodika ocenki riskov vozniknoveniya chrezvychajnyh situacij v mul'timodal'nyh perevozkah / O.G. Faustova. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2014. № 1, p. 109-116.
8. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis. S. Kristiansen. Elsevier 2010. 508 p.
9. Jin D., A model of fishing vessel accident probability. D. Jin., H. L. Kite-Powell, E.Thunberg, .R. Solow & W.K Talley. Journal of Safety Research, 2002, 33: Pp. 497-510 .
10. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties. L. Kobyliński. Trans Nav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2009, 3 (4). Pp. 443-448.
11. Moysenko S.S. Meyler L.E. Prognostic Estimation of Ship Stability in Extreme Navigation Conditions. S.S. Moysenko, L.E. Meyleryu - Proceedings of the International Symposium TransNav 2013. Marine navigation and safety of sea transportation. Maritime Transport and Shipping, Gdynia, Poland, June 2013. Pp. 271-276.

УДК 658.263 + 303.725.2

ВЕРОЯТНОСТНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИПОРТОВОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Дмитрий Владимирович Луценко

кандидат технических наук, научный сотрудник технопарка
Калининградского государственного технического университета
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: lutsenko@bk.ru

Аннотация

Современный припортовый региональный электротехнический комплекс является крупным инфраструктурным объектом, обладает негауссовыми свойствами и представляет собой техноценоз. Его энергетическая эффективность является залогом роста конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности всей портовой инфраструктуры. Повышать энергетическую эффективность инфраструктурных объектов возможно путём применения методов программно-целевого планирования, основанных на имитационной модели процесса функционирования. Для её создания автор представил отдельный потребитель электрической энергии детерминированным автоматом, функционирующим в случайной среде, региональный электротехнический комплекс их семейством, а нацеленный на энергосбережение процесс электропотребления – «игрой в размещение» ранговых вероятностных автоматов. Предполагается, что взаимодействие автоматов осуществляется на основе правила непосредственного информационного обмена, нацеливающего на получение системного результата. Разработана схема «игры в размещение», реализующая алгоритм наибольшего подобию при разрешении спорных рангов. Её многократная компьютерная реализация позволяет получить априорные оценки результатов энергосбережения, отличающиеся учётом негауссовых и структурных свойств припортового регионального электротехнического комплекса.

Ключевые слова: ранговая конфигурация, ранговая структура, ранговый вероятностный автомат, ранговое размещение, игра в размещение, комбинаторная теория ранговой динамики, ранговое распределение, техноценоз.

PROBABILISTIC-AUTOMATIC MODELING ELECTRIC POWER CONSUMPTION OF THE PORTAL REGIONAL ELECTROTECHNICAL COMPLEX

Dmitry V. Lutsenko

Candidate of technical sciences, scientific employee of technopark
Kaliningrad state technical university,
Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: lutsenko@bk.ru

Abstract

A modern port regional electrotechnical complex is a large infrastructural object, it has non-gaussian properties and is a technocenos. Its energy efficiency is the key to increasing the competitiveness and investment attractiveness of the entire port infrastructure. Its energy efficiency is the key to increasing competitiveness and investment attractiveness of the entire port infrastructure. It is possible to increase the energy efficiency of infrastructure facilities by applying methods of program-target planning, based on a simulation model of the functioning process. For its creation, the author presented a separate consumer of electrical energy to a deterministic automaton functioning in a random environment, a regional electrical complex of their family, and the process of electrical consumption aimed at energy saving – a «game of placement» of rank probabilistic automaton. His made it possible to take into account the dual nature of the rank parametric distribution. On the one hand, the action of the automaton models the occupation of a discrete rank, and, on the other hand, the response of the environment depends on the rank compliance indicator obtained from the continuous distribution function of the electrical consumption of the object. It is assumed that the interaction of automata is carried out on the basis of the rule of direct exchange, aimed at obtaining a system result. A scheme of «game of placement» has been developed that implements the algorithm of the greatest similarity when resolving controversial ranks. Its multiple computer implementation allows one to obtain a priori estimates of the results of energy saving, which differ by taking into account the non-gaussian and structural properties of the port regional electrotechnical complex.

Key words: rank configuration, rank structure, rank probability automaton, rank placement, placement game, combinatorial theory of rank dynamics, rank distribution, technocenos

Введение

Энергетическая эффективность припортового регионального электротехнического комплекса является залогом роста конкурентоспособности и инвестиционной привлекательности всей портовой инфраструктуры. В современном мире ресурсосберегающие технологии и энергосбережение относятся к критически важным направлениям развития науки и техники. Повышать энергетическую эффективность инфраструктурных объектов возможно путём применения методов программно-целевого планирования в сочетании с постоянно действующей системой энергоменеджмента.

Припортовый региональный электротехнический комплекс (далее – РЭК), являющийся частью портовой инфраструктуры, предлагается представить моделью техноценоза [1, 2]. Под региональным электротехническим комплексом понимается ограниченная в пространстве и времени, обладающая техноценологическими свойствами совокупность потребителей электрической энергии, функционирующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения [1]. Потребитель РЭК рассматривается как объект, выделяемый по следующим признакам: целенаправленность функционирования, как правило, обусловленная самостоятельной экономической деятельностью; собственный учёт электрической энергии; наличие подсистемы управления в лице ответственного за электрохозяйство или энергетика. На практике объект – это оператор морского терминала (юридическое лицо) или крупный технологический потребитель [1].

Традиционно в техноценологическом подходе состояние системы описывается ранговым параметрическим распределением, под которым понимается невозрастающая совокупность значений параметра, поставленных в соответствие определённому рангу [2]. Ранговое распределение строится по параметру электропотребления (далее – ЭП), измеряемого в кВт·ч за интервал (год, месяц, день и т.д.). Аналитически ранговое параметрическое распределение описывается следующей функцией [1-3]:

$$w(r) = \frac{W_1}{r^\beta}, \tag{1}$$

где r – ранг объекта; W_1, β – параметры функции; $w(r)$ – электропотребление r -го ранга

Пусть для РЭК проведено энергетическое обследование и получены два распределения: $w(r)$ характеризует текущее электропотребление, а $w^*(r)$ – целевое, которого требуется достичь в результате организации направленного на энергосбережение процесса. На их основе по следующему выражению оценивается системный потенциал энергосбережения (рис. 1) [1]:

$$\Delta W = \int_0^\infty w(r) dr - \int_0^\infty w^*(r) dr. \tag{2}$$

Реализация системного потенциала предусматривает разработку плана повышения энергетической эффективности, включающего комплекс организационно-технических мероприятий.



Рис. 1. Системный потенциал энергосбережения

Данный план устанавливает объектам нормы снижения электропотребления. Однако, нормы снижения получены на основе системного потенциала энергосбережения и характеризуют определённый ранг, но в конкретном ранге могут находиться разные объекты и не ясно, для которого из них применяется данная норма. Кроме того, необходимо оценить вероятность выполнения плана за РЭК в целом, имея в распоряжении лишь информацию по электропотреблению его отдельных объектов. Разрешить данное противоречие предлагается путём применения методов теории автоматов [4] и комбинаторной теории ранговой динамики [3].

1. Ранговый вероятностный автомат

В комбинаторной теории ранговой динамики определено, что результатом ранжирования является ранговое отображение $\pi: I \rightarrow R$, устанавливающее взаимно-однозначное соответствие между множеством объектов I и множеством рангов R . Также ранговое отображение π является комбинаторной конфигурацией, характеризующей случайное размещение объектов по рангам. По предыстории электропотребления РЭК строится последовательность ранговых отображений $\pi(t) = \pi_1, \dots, \pi_t, \dots, \pi_T = [\pi_t]_{t=1}^T$, где T есть количество временных интервалов. Каждому $\pi \in \pi(t)$ соответствует подстановочная матрица $\Pi = \|\pi_{i,j}\|_{i,j=1}^n$, $\pi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \pi(i) = j; \\ 0, & \pi(i) \neq j, \end{cases}$ где n есть количество объектов РЭК.

По следующему выражению:

$$B = \bigvee_{t=1}^T \Pi_t \tag{3}$$

строится матрица смежности двудольного рангового графа $G = (X \cup Y, E)$, в котором множество вершин левой доли $X = \overline{1, n}$ суть объекты, множество вершин правой доли $Y = \overline{1, n}$ суть ранги, а отдельная дуга $e \in E$ характеризует факт занятия в предыстории объектом $i \in X$ ранга, равного $r \in Y$.

Полученный двудольный граф отражает структурные свойства РЭК, определяя допустимые размещения объектов по рангам.

В соответствии с ранговым графом **G** объект на целевом распределении $w^*(r)$ должен занимать определённые ранги и иметь соответствующие им значения ЭП. Тогда на основе функции плотности распределения ЭП объекта можно определить вероятность того, что его ЭП не превысит требуемое значение, устанавливаемое целевым распределением $w^*(r)$. Данная величина называется показателем рангового соответствия, характеризует способность объекта, находящегося в определённом ранге, не превышать значение ЭП, устанавливаемое целевым ранговым распределением (рис. 2). Определяется следующим образом:

$$p(r) = \int_{-\infty}^{w^*(r)} f(x) dx; \quad \bar{p}(r) = 1 - p(r), \quad (4)$$

где $f(x)$ – функция плотности вероятности ЭП объекта; $w^*(r)$ – целевое ранговое параметрическое распределение; $\bar{p}(r)$ – показатель рангового несоответствия.

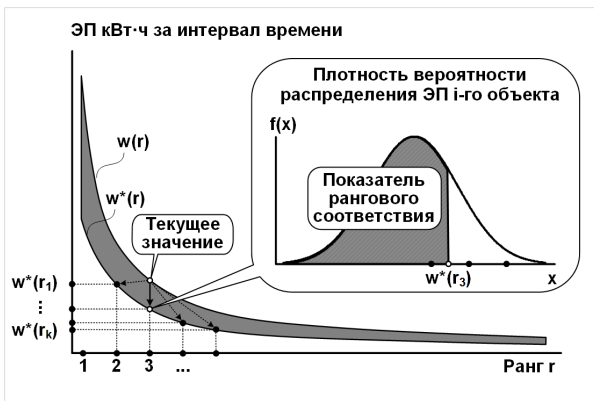


Рис. 2. К порядку определения показателя рангового соответствия

Таким образом, показатель рангового соответствия устанавливает вероятность получения p или неполучения \bar{p} требуемого результата. Ранг, предписанный для занятия объекту ранговым двудольным графом **G**, характеризуется значением показателя рангового соответствия. Каждый объект РЭК в направленном на энергосбережение процессе ЭП стремится занимать ранг с наибольшим показателем рангового соответствия. На системном уровне это влияет на вероятность появления определённых ранговых конфигураций.

Представим занятие объектом рангов на распределении $w^*(r)$ работой автомата с линейной тактикой в случайной среде [4]. Суть этой работы заключается в последовательном выполнении действий по занятию рангов и получению в соответствии с данными действиями реакций среды. Тогда функционирование РЭК представляется направленной на энергосбережение работой семейства таких автоматов. Введём ранговый вероятностный автомат (далее – РВА), который: а) моделирует объект РЭК; б) выполняет

действие по занятию одного из разрешённых ему рангов r ; в) воспринимает реакцию среды, определяющую с вероятностью $p(r)$ (4) требуемый результат, а с вероятностью $1 - p(r)$ – его отсутствие. Работа РВА (рис. 3) описывается следующей цепочкой: занятие ранга согласно текущего состояния → реакция среды → переход в новое состояние в соответствии с реакцией среды.

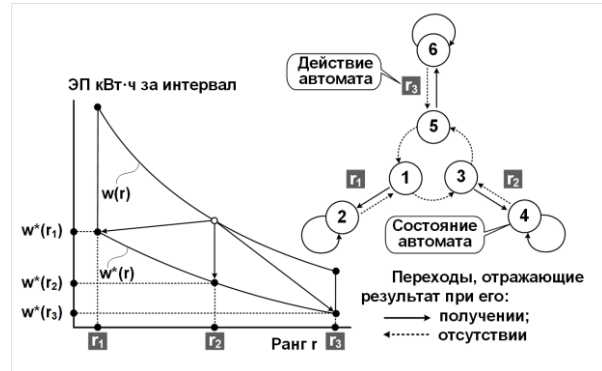


Рис. 3. Конструкция рангового вероятностного автомата

Отношение между множеством действий РВА и множеством его состояний представляет собой двудольный регулярный граф, в котором степень вершин правой доли соответствует глубине памяти (рис. 4).

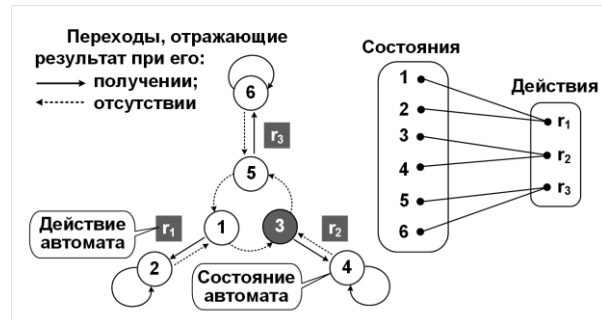


Рис. 4. Граф, характеризующий отношение между множествами состояний и действий автомата

Переход РВА в различные состояния установлен матрицей перехода, которые для автомата с глубиной памяти, равной трём, выглядят следующим образом (рис. 4):

$$P^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad P^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где P^+ – матрица перехода при получении и P^- – матрица перехода при отсутствии требуемого результата.

Рассмотрим пример (рис. 4), согласно которому объект системы, перемещаясь с $w(r)$ на $w^*(r)$, может занимать произвольный ранг из множества $R = \{r_1, r_2, r_3\}$. Начальным является состояние с номером 3, которое соответствует действию по занятию ранга, равного r_2 . Выполненное действие

с вероятностью $p(r_2)$ приводит к требуемому результату, а с вероятностью $\bar{p}(r_2)$ – нет. В случае получения требуемого результата автомат переходит в состояние 4, а при его отсутствии – в состояние 5. В следующем такте автомат, находясь в состоянии 5, занимает ранг r_3 и в соответствии с реакцией среды переходит в новое состояние. Состояние считается новым, так как автомат перешёл в него в очередном такте. Если автомат, находясь в состоянии 4 и выполнив действие r_2 , получит требуемый результат, то останется в нём, в противном случае – перейдёт в состояние 3.

Таким образом, применение РВА позволяет учесть отмеченную в [3] двойственную природу ранговых распределений: в результате ранжирования по значению непрерывного параметра электропотребления объектам присваиваются дискретные ранги. В предположении неизменности ранговой структуры, моделируя взаимодействие семейства РВА со средой, имеется возможность априорно оценить результативность энергосберегающих мероприятий, построенных на основе заданного целевого рангового параметрического распределения.

2. Моделирование целенаправленного управляемого процесса электропотребления

Пусть управляющая подсистема для достижения системного результата имеет в распоряжении набор правил, устанавливающих непосредственный информационный обмен между автоматами (рис. 5). Руководствуясь принципом целесообразности, автоматы занимают ранги с наибольшим показателем рангового соответствия (4). При этом возникают спорные ранги, разрешает которые управляющая подсистема. Работа семейства автоматов представляется «игрой в размещение» на целевом распределении. Участником в игре является автомат, его стратегией ранг, а результатом партии – конфигурация π .

Действие автомата по занятию ранга на $w^*(r)$ моделирует выполнение объектом нормы снижения ЭП, вычисляемой по выражению вида:

$$\Delta w(r) = w - w^*(r), \tag{6}$$

где w – текущее ЭП. Введём энергетический эквивалент выигрыша:

$$y(r) = \Delta w(r) \cdot p - \Delta w(r) \cdot (1 - p), \tag{7}$$

«выплачиваемый» объекту в случае получения требуемого результата и «возвращаемый» при его отсутствии.

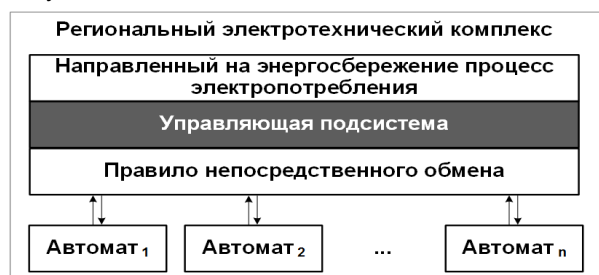


Рис. 5. Автоматное представление РЭК

На основе (4), (6) и (7) зададим условия «игры в размещение» квадратными матрицами:

$$\mathbf{P} = \| \| p \| \|_{n \times n}; \mathbf{X} = \| \| x \| \|_{n \times n}; \mathbf{Y} = \| \| y \| \|_{n \times n}, \tag{8}$$

где \mathbf{P} – матрица показателей рангового соответствия; \mathbf{X} – матрица норм снижения; \mathbf{Y} – матрица выигрышей; n – количество объектов.

Любую из матриц \mathbf{P} , \mathbf{X} , \mathbf{Y} можно представить как таблицу в задаче о назначениях, решением которой является подстановка $s \in \mathbf{S}_n$, соответствующая экстремуму [3]. Подстановка $s \in \mathbf{S}_n$ является также результатом партии «игры в размещение», который описывается следующими показателями:

$$n_\Sigma = \sum_{i=1}^n p_{i,s(i)}; x_\Sigma = \sum_{i=1}^n x_{i,s(i)}; y_\Sigma = \sum_{i=1}^n y_{i,s(i)}, \tag{9}$$

где n_Σ – математическое ожидание количества объектов, выполнивших норму снижения ЭП; x_Σ – расчётное ЭП при условии выполнения всеми объектами норм снижения; y_Σ – выигрыш системы; s – подстановка.

Для показателей (7) путём решения задачи о назначениях можно определить экстремумы:

$$\begin{aligned} n_{max} &= \max_{s \in \mathbf{S}_n} \left(\sum_{i=1}^n p_{i,s(i)} \right); \\ x_{max} &= \max_{s \in \mathbf{S}_n} \left(\sum_{i=1}^n x_{i,s(i)} \right); \\ y_{max} &= \max_{s \in \mathbf{S}_n} \left(\sum_{i=1}^n y_{i,s(i)} \right). \end{aligned} \tag{10}$$

Пусть управляющая подсистема (рис. 5) имеет в распоряжении набор алгоритмов \mathbf{A} , устанавливающих правила непосредственного информационного обмена, критерии выбора которых описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} e_n(a) &= (n_{max} - \bar{n}_{\Sigma a}) \xrightarrow{a \in \mathbf{A}} 0; \\ e_x(a) &= (x_{max} - \bar{x}_{\Sigma a}) \xrightarrow{a \in \mathbf{A}} 0; \\ e_y(a) &= (y_{max} - \bar{y}_{\Sigma a}) \xrightarrow{a \in \mathbf{A}} 0, \end{aligned} \tag{11}$$

где $\bar{n}_{\Sigma a}$, $\bar{x}_{\Sigma a}$, $\bar{y}_{\Sigma a}$ – средние значения показателей (9), полученные на основе результатов по многократному моделированию «игры в размещение» с использованием алгоритма $a \in \mathbf{A}$.

Рассмотрим схему «игры в размещение», построенную по алгоритму наибольшего подобия (рис. 6). На основе данных по ЭП РЭК строится двудольный ранговый граф и матрица показателей рангового соответствия. После инициализации очередной партии составляется список автоматов. В первой реализации для всех автоматов текущим является первое состояние (рис. 3, 4). Далее из списка случайно выбирается автомат, который занимает ранг и в соответствии с реакцией среды переходит в новое состояние. Реакция среды моделируется бернуллевской случайной величиной ξ с вероятностью успеха, равной показателю рангового соответствия. Новое

состояние автомата назначается текущим. После выбора всех автоматов партия завершается и выполняется поиск свободных рангов. Для каждого свободного ранга определяются разрешённые объекты и в нём размещается тот из них, который в

партии занял ранг с наименьшим показателем рангового соответствия. После разрешения спорных рангов результаты партии сохраняются в базе данных.



Рис. 6. Схема алгоритма, реализующего «игру в размещение»

Заключение

Рассмотренная схема «игры в размещение» на основе РВА учитывает негауссовыи и структурные свойства РЭК, позволяет априорно оценить результативность энергосберегающих мероприятий, что закладывает основу для исследования эффективности электропотребления.

Таким образом, в статье представлены основы вероятностно-автоматного моделирования электропотребления РЭК, расширяющие применение методов программно-целевого планирования по повышению энергоэффективности.

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. Кудрин, Б.И. Введение в технетику. Томск: Издательство ТГУ, 1993. 552 с.
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. Варшавский, В.И., Поспелов, Д.А. Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 224 с.

References

1. Kudrin, B.I. Vvedeniye v tekhnnetiku. Tomsk: Izdatelstvo TGU. 1993. 552 p.
2. Gnatyuk, V.I., Kivchun, O.R., Yafasov, A.Ya. (2017) Opredeleniye potentsiala energosberezheniya obyektov priportovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa v ramkakh razvitiya intellektualnykh energeticheskikh sistem. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 3(37). T.1. 142-149.
3. Lutsenko, D.V. (2017) Osnovy primeneniya kombinatornoy teorii rangovoy dinamiki v issledovanii funktsionirovaniya priportovogo regionalnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. Morskiye intellektualnyye tekhnologii. 4(38). T.2. 122-127.
4. Varshavskiy, V.I., Pospelov, D.A. Orkestr igrayet bez dirizhera: razmyshleniya ob evolyutsii nekotorykh tekhnicheskikh sistem i upravlenii imi. M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM». 2009. 224 p.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание

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

e-mail: mit-journal@mail.ru

www.morintex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте www.morintex.ru
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор
6. 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).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

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 9000 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**