

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
0100011011000001101101100010100100111010011100110100111010011010101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
0100011011000001101101100010100100111010011100110100111010011010101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 4 (38) Т.2 2017

Калининградский государственный технический университет



ТРУДЫ V Международного Балтийского морского форума

Том 2

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (38) Т.2) 2017 www.morintex.ru, ISSN № 2073-7173,

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 морской государственный 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 государственный 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 морской государственный университет

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

Д.А. Скороходов, д.т.н., профессор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

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

А.Е. Богданов к.т.н. — ОАО «Системы управления»

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

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

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический 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 от 19.09.2008

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

190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская 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



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (38) V.2 2017 www.morintex.ru ISSN 2073-7173,

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

A. E. Bogdanov, PhD, JSC "Control Systems"

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

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



51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

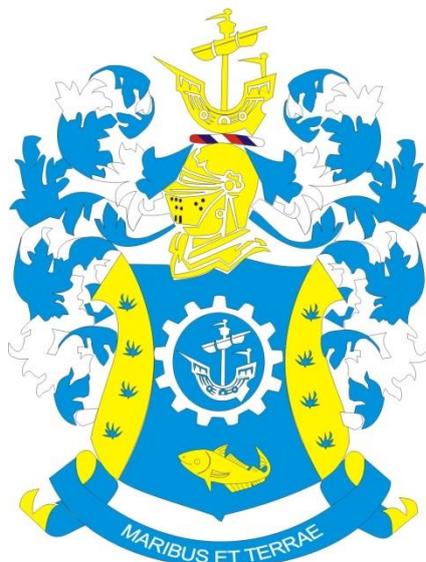
Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

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

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

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





**Калининградский государственный технический
университет**

**Труды
V Международного
Балтийского морского форума**

21-27 мая, 2017 г.

Том 2

Vol. 2

Proceedings

**V International Baltic Maritime Forum
Kaliningrad State Technical University**

May 21-27, 2017



Мы живем в удивительное время стремительных перемен в естествознании и биофизике, медицине и информатике, энергетике и робототехнике, которые порой, кажется, стирают границы между виртуальной, дополненной и настоящей реальностью. Университеты – флагманские корабли отраслей и регионов в океане науки и технологий, на чьи плечи легла большая ответственность прокладывания курса в экономику знаний.

Морские университеты, расположенные в приморских территориях, острее других чувствуют дыхание, и недостаток времени, отводимого на ускорения в нужных направлениях человеческого прогресса. Приморские территории, как показывает опыт стран Юго-Восточной Азии и Скандинавии, являются драйверами роста национальных и региональных экономик, а их Особые экономические зоны - настоящие локомотивы национальных экономик. Наиболее остро это чувствуется в регионе Балтийского и Северного морей, где располагаются 38 морских вузов и факультетов различных стран, десятки НИИ и КБ, сотни предприятий и организаций морехозяйственной деятельности. Возможно, поэтому первая двадцатка стран в мире по качеству жизни на добрую половину заполнена странами этого региона. Сегодня уже не надо никого убеждать в том, что будущее мировой экономики в новых знаниях, а к ресурсам недр Земли и Мирового океана надо относиться бережно и рачительно.

Исторически сложилось, что главным поставщиком высокопрофессиональных специалистов инженерной подготовки, техников, механиков, айтишников не только для рыбохозяйственного комплекса России, но и всей экономики Калининградской области является Калининградский государственный технический университет – старейший вуз рыбной отрасли Российской Федерации. Поэтому стратегической целью наш университет ставит обеспечение международной конкурентоспособности среди морских вузов региона Балтийского и Северного морей по важнейшим направлениям подготовки кадров, научных исследований и инноватики.

КГТУ представляет сегодня большой научно-образовательный и инженерно-технологический комплекс, в котором работают порядка 1000 преподавателей, учатся около 12 тысяч студентов и курсантов, а в ассоциацию малых инновационных предприятий технопарка входят 14 МИП. За последние 3 года, с 2015 по 2017 гг. учеными КГТУ разработана и получила поддержку и одобрение АСИ концепция морских национальных

предпринимательских университетов, которые должны стать ядрами кристаллизации морской науки и технологий, перехода к цифровой экономике на приморских территориях России - выходах Мировому океану. Проект «Пионер-М», выполненный с использованием информационных и аддитивных технологий, стал победителем всероссийского конкурса по малому судостроению и получил высокую оценку Президента страны В.В.Путина. Аналогичную оценку получили умные мобильные фабрики модульного типа по переработке морского биосырья на международном Китайско-Российском Форуме инноваций 6-8 сентября с.г. в Вэйхае. В стадии внедрения проект модифицированного малого рыболовного судна для рыболюбцевских организаций Северо-Западного региона России.

Университет на сегодняшний день является интегратором малых инновационных предприятий Калининградской области. Сотрудниками технопарка КГТУ и МИП разработана методология для формирования региональной инфраструктуры и ресурсов для взаимодействия субъектов государственных и муниципальных структур, науки и предприятий посредством организации интерактивной сети. Разработаны программные продукты «Smart Ship», «Smart Port», «Smart Municipality» и др. Они позволяют модернизировать систему управления, существенно продвинуться в организации инновационного предпринимательства, в первую очередь, - в области NBICS (нано-, био-, инфо-, когно-, социо) технологий.

Ежегодно КГТУ проводит Международный Балтийский морской форум, который стал одним из крупных ежегодных международных событий Балтийского региона и на котором собираются св. 1000 участников из России, стран Балтии, Скандинавии, Германии, Польши и др.

Традиционно в рамках Форума проводится конференция «Инновационное предпринимательство», бизнес-тренинги с приглашением известных в стране и за рубежом предпринимателей, конкурсы инновационных идей и разработок, выставка новых приборов и оборудования, круглые столы и деловые игры, акцентированные на морскую экономику.

Лучшие материалы Балтийского морского форума по рекомендации международного Оргкомитета публикуются отдельными выпусками в научном журнале ВАК «Морские интеллектуальные технологии».

Следующий VI Балтийский форум состоится в 2018 году и будет проходить с 3 по 7 сентября на берегу Балтийского моря в курортном городе Светлогорске на площадке современного многофункционального комплекса «Янтарь Холл». Приглашаем авторов и читателей журнала «МИТ» на наш ежегодный Форум.

Ректор Калининградского государственного
технического университета
В.А. Волкогон

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
О журнале	10
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитровский В.А. Математическая модель столкновения судов при движении произвольными курсами	12
ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. К вопросу о сценарии гибели судов во время шторма вследствие захвата волной их носовой оконечности	27
Притыкин А.И. Коррозионный износ и его влияние на напряженное состояние наружной обшивки корпусов судов	34
Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. Нечаев Ю.И., Прохнич В.П. Проблемы самоорганизации при взаимодействии судна с внешней средой	39
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ	
Дятченко С.В., Коробчинский В.А., Лисицин А.А. Математическая модель для оценки устойчивости средних траулеров на ранних стадиях их проектирования	49
Дятченко С.В., Тананыкин С.В. Математические модели для оценки технико-экономических характеристик траулеров на ранних стадиях их размерной модернизации	55
Гуральник Б.С., Евтушенко И.Д., Подколзин С.С. О необходимости учета разжижения груза бортовой интеллектуальной системы для обеспечения безопасности судна	64
ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.В. Повышение стойкости к коррозии судовых металлоконструкций	69
Десярев А.В., Морозов В.Н. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития	76
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	
Белей В.Ф. Горбатов В.С. Повышение надежности электроснабжения объектов морской индустрии и Калининградской области	83
Белей В.Ф., Задорожный А.О. Ветропарки морского базирования: новейшие технологии	88
Архипов М.И., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование влияния геометрических характеристик профиля канала жалюзи на эффективность очистки вторичного пара в сепараторах судовых опреснителей	93
Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Расчет и контроль ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей	100
Лещинский М.Б., Никулин Т.Р. Некоторые особенности водородно-кислородного генератора нового поколения	104
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ	
Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В. Динамическая модель управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса	112
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
Дорофеев С.А., Кивчун О.Р. Снижение электропотребления при эксплуатации объектов припортового электротехнического комплекса на основе оценки системного и объектного потенциалов энергосбережения	117
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ	
Луценко Д.В. Основы применения комбинаторной теории ранговой динамики в исследовании функционирования припортового регионального электротехнического комплекса	122

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Мнацаканян А.Г., Мнацаканян Р.А. Принципы финансового моделирования проектов государственно-частного партнерства в рыбохозяйственном комплексе	128
Станкевич Т.С. Разработка программного продукта для информационной и аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах	136
Волкогон В.А., Кострикова Н.А., Яфасов А.Я. Морские предпринимательские университеты в морской экономике России в новых условиях	142
Кузин В.Л., Харин А.Г. Метод управления системами рыбохозяйственного комплекса в условиях неполноты и неопределенности информации	152
Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е.В., Яфасов А.Я. Технология создания системы распределенных ситуационных центров	159
Яфасов А.Я., Меркулов А.А., Липская А.С. Проблемы и пути модернизации янтарной области России	167

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Волкогон В.А., Недоступ А.А., Ражев А.О., Кострикова Н.А., Поляков Р.К., Кузин В.И. Обоснование создания тренажерного комплекса по проектированию и моделированию траловых систем	177
--	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Альтшуль Б.А., Наумов В.А. Динамика вертикального подъема груза из воды лебедкой с помощью синтетического каната	186
Наумов В.А. Пространственная форма цепи при воздействии течения и ветра на судно, стоящее на одном якорю	191

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Синявский Н.Я., Корнева И.П. Исследование возможностей инверсии интегральных преобразований в релаксометрии ЯМР полимеров судового оборудования	196
Недоступ А.А., Ражев А.О. Применение неявных конечно-разностных схем в задачах моделирования динамики траловых систем	202
Недоступ А.А., Ражев А.О., Коротков В.К. Дискретная математическая модель гибкого подъемного тралового щитка	207
Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Рушко М.В. Алгоритм оценки вероятности битовой ошибки для систем с восьмиуровневой фазовой манипуляцией	212

CONTENTS

	page
About journal	10
SHIP BUILDING	
Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Vladimir A. Dmitrovskiy Mathematical model of collision of ships during the random courses movement	12
THEORY OF SHIP AND STRUCTURES	
Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy More on the wreck of ship scenarios during a storm due to the seizure by the wave of their fore end	27
Alexej I. Pritykin Corrosion wear and tear and its influence on the stress state of shell plating of the ship hulls	34
Evgeny P. Burakovskiy, Pavel E. Burakovskiy, Yury I. Nechaev, Vladimir P. Prokhnich Governance issues at the vessel interaction with the external environment	39
SHIP DESIGNING AND STRUCTURE	
Sergey V. Dyatchenko, Valeriy A. Korobchinskiy, Alexander A. Lisitsyn Mathematical model for the middle trawlers stability estimation at the early stages of their design	49
Sergey V. Dyatchenko, Sergey V. Tananykin Mathematical models for estimation of techno-economic characteristics of trawlers at the early stages of their modernization	55
Boris S. Guralnik, Ivan D. Evtushenko, Sergey S. Podkolzin To the question of cargo dilution calculation necessity by the board intelligent system for the vessel safety	64
SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION	
Valery I. Verevkin, Valery F. Igushev, Svetlana A. Terusheva Improving corrosion resistance of ship structures	69
Alexander V. Dektyarev, Vladimir N. Morozov Additive technologies in the shipbuilding industry and prospects for their development	76
SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	
Valeriy F. Beley, Dmitry S. Gorbатов Improving electricity supply of marine industry and Kaliningrad region objects	83
Valeriy F. Beley, Andrey O. Zadorozhnyy Offshore wind parks: the newest technologies	88
Maksim I. Arkhipov, Alexandr G. Filonov Experimental research on the influence of the geometric characteristics of channel louvre to the efficiency steam separators for ship desalination plants	93
Leonid I. Kovalchuk, Marina V. Isayeva Calculation and control of the diesel-rated characteristics of marine diesel engines	100
Mark B. Leschinsky, Timofey R. Nikulin Some peculiarities of the new generation hydrogen-oxygen generator	104
INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS	
Victor I. Gnatyuk, Oleg R. Kivchun, Dmitry V. Lutsenko Dynamic model of controlling electric consumption of objects of the port electrotechnical complex	112
CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION	
Sergey A. Dorofeev, Oleg R. Kivchun Decrease in electrical energy consumption in the course of operation of objects of the dock side electrotechnical complex based on the assessment of system-wide and facility-level potentials of energy saving	117

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

Dmitry V. Lutsenko Bases of application of the combinatory theory of ranked dynamics in the research of the functioning of the regional electrical engineering complex of marine port 122

Albert G. Mnacakanyan, Robert A. Mnacakanyan Principles of financial modeling of PPP projects in fisheries..... 128

Tatiana S. Stankevich Development of software for information and analytical support of fire fighting management process at seaports 136

Vladimir A. Volkogon, Nataliyad A. Kostrikova, Abdurashid Ja. Yafasov Maritime entrepreneurial universities as a system fundamentals of the generation of marine intellectual technologies 142

Vladimir I. Kuzin, Aleksandr G. Kharin The method of management of fisheries economy in incomplete and uncertainty of information 152

Fedor G. Maitakov, Aleksandr A. Merkulov, Evgeniy V. Petrenko, Abdurashid Ya. Yafasov Technology of distributed situation centers system engineering 159

Abdurashid Y. Yafasov, Alexander A. Merkulov, Anastasiya S. Lipskaya Problems and ways of amber industry modernization of Russia 167

DESIGNING AUTOMATION SYSTEMS

Vladimir A. Volkogon, Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev, Natalia A. Kostrikova, Ruslan K. Polyakov, Vladimir I. Kuzin Justification of creation of a training complex for designing and simulation of trawl systems..... 177

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

Boris A. Al'tshul', Vladimir A. Naumov Dynamics of vertical cargo lift of the water by the winch with synthetic rope 186

Vladimir A. Naumov Spatial form of the chain when exposed to stream and wind on the ship ridden at single anchor 191

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Nikolay Y. Sinyavsky, Irina P. Korneva Study of possibility of integral transforms inversion in NMR relaxometry of shipboard equipment polymers 196

Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev Application of implicit difference schemes for the trawl systems dynamics 202

Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev, Viktor K. Korotkov Discrete mathematical model of the trawl lifting flexible hydrodynamic flap 207

Elena V. Volkhonskaya, Evgeniy V. Korotey, Margarita V. Rushko Bit error probability estimating algorithm for systems with eight level phase manipulation 212

О ЖУРНАЛЕ

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.

Тематика

Тематика журнала соответствует следующим специальностям научных работников номенклатуры ВАК: кораблестроение (теория корабля и строительная механика, проектирование и конструкция судов, технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства, судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные), физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие); информатика, вычислительная техника и управление (системный анализ, управление и обработка информации, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, управление в социальных и экономических системах, математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, системы автоматизации проектирования, теоретические основы информатики, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Основные направления

- Интеллектуальные технологии в проектировании кораблей и судов, компьютеризация процессов проектирования (управление и организация проектирования, системы автоматизированного проектирования). Морская история и техника.
- Интеллектуальные технологии в строительстве и ремонте кораблей и судов (перспективные технологии в строительстве и ремонте судов, автоматизированные системы подготовки производства, использование роботов).
- Интеллектуальные технологии в эксплуатации кораблей и судов (системы автоматизации кораблей и судов, автоматизированные системы управления, проблемы судовой эргономики, экология).
- Интеллектуальные технологии в прикладных исследованиях (математическое моделирование и компьютерный эксперимент, строительная механика, гидроаэродинамика, термодинамика, физические поля корабля).
- Интеллектуальные технологии в морской и судовой энергетике. Энергосберегающие технологии.
 - Интеллектуальные технологии морского приборостроения.
 - Искусственный интеллект в морских технологиях.
 - Интеллектуальные технологии в маркетинговых исследованиях.
 - Экономика и финансы в судостроении
 - Кораблестроительное образование

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.

Subject

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers cording 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 СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОИЗВОЛЬНЫМИ КУРСАМИ**Евгений Петрович Бураковский**

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

Владимир Алексеевич Дмитриевский

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

Аннотация

Предлагаемая работа является обобщением и развитием результатов серии предыдущих статей авторов, посвящённых определению вероятностей столкновения в так называемых “неуправляемых” моделях движения судов. Несколько моделей, рассмотренных в них, объединяло одинаковое разбиение вывода результатов на первую часть, связанную с интенсивностью потока судов, и вторую часть, связанную со скоростями, длинами и ширинами судов. Если вторые части вывода результатов рассматриваемых моделей были специфичными для каждой из них, то первые были почти идентичными, занимая при этом по объёму примерно половину текста. Учитывая громоздкость формул этих частей, возникла необходимость так изложить материал, чтобы раз и навсегда избежать повторения выводов первых частей. В настоящей работе получен универсальный результат для опасности столкновения судов D , который имеет следующую структуру: $D=I \cdot M$, где I – интенсивность потока судов, а M – математическое ожидание некой случайной площади, зависящей только от случайных скоростей, длин и ширин судов. После этого анализ каждой последующей модели сократился в объёме почти в два раза, сведясь к геометрическому анализу указанных случайных площадей. В качестве примеров рассмотрены несколько моделей пересечения фарватера и движения судна в попутном и встречном потоках судов. Для них даны примеры численных расчётов опасностей столкновений.

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

MATHEMATICAL MODEL OF COLLISION OF SHIPS DURING THE RANDOM COURSES MOVEMENT**Evgeny P. Burakovskiy**

Dr.Sci.Tech., professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

Ph. D., associate professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Vladimir A. Dmitrovskiy

Ph. D., Chief specialist in software architecture

Kaliningrad State Technical University
 Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
 e-mail: vdmittrovsky@mail.ru

Abstract

The represented article is a generalization and advancement of results of previous articles by authors, which was devoted to analysis of a danger of ships accidents in so called "unmanned" models of ships movement. These models had similar structure. The first half of every article dealt with the ships stream only and was almost identical. The second one considered only ships velocities, lengths and widths and was specific for every model. Taking into consideration the bulkiness of formulae of the first part, it was necessary to generalize it to avoid repetitive content once and forever. In the present article we obtained the universal result for the accident danger D , having the following structure: $D=I \cdot M$, where I is intensity of ships stream and M is mathematical expectation of some random square dependent on random ships velocities, lengths and widths only. After that the analysis of every of the following models was reduced to the second half only. Some models of crossing the waterway and ships movement in the same or opposite direction was examined as an examples with calculations of related accident dangers.

Keywords: mathematical model, accident danger, probability, random variable, 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 настоящей работе предлагается общая вероятностная модель движения судна в потоке прочих судов с целью анализа вероятностей их безаварийного плавания в течение некоторого интервала времени T , при этом суда могут двигаться в произвольных направлениях.

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. В зависимости от специфики конкретной модели прочие суда могут именоваться иначе – попутными, встречными и т.д. 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 судов,
2. модель потока прочих судов,
3. модель столкновения судов.

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

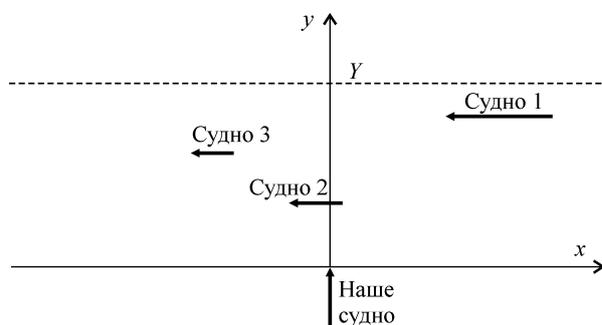


Рис. 1. Схема пересечения фарватера с судами нулевой ширины

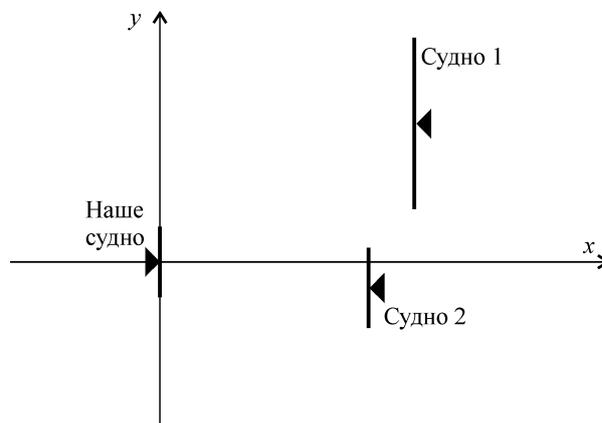


Рис. 2. Движение во встречном потоке с судами нулевой длины

В рамках общей модели будут рассмотрены и частные модели, которые распадаются на два больших класса:

1. Пересечение нашим судном судоходного фарватера (полуограниченный поток прочих судов, Рис.1),

2. Движение нашего судна в неограниченном потоке прочих судов (Рис. 2).

Для краткости, мы будем их называть моделями фарватера и моделями неограниченного потока соответственно, причём слово "модели" часто будем опускать.

Для моделей фарватера интервал T , чаще всего, мы выбирать не будем. Его величину мы, как правило, будем полагать равной либо нулю, либо времени пересечения акватории фарватера нашим судном, которое зависит от ширины фарватера (всегда обозначается Y) и характеристик нашего судна. Это объясняется тем, что одновременный учёт длины интервала T и ширины фарватера Y делает все получаемые формулы, и без того громоздкие, просто нечитаемыми (формулы (44), (45)).

Для моделей неограниченного потока интервал T может быть произвольным.

Все частные модели получаются из общей посредством различных ограничений на

1. характер потока прочих судов (фарватер – неограниченный поток),
2. угол между направлениями движения нашего судна и потока прочих судов,
3. длины и ширины нашего и/или прочих судов.

Полагая для разных частных моделей длины или ширины равными 0, удаётся получить упрощённые формулы для вероятностей безаварийного движения, которые более явно подчёркивают влияние основных факторов. Например, в моделях встречного или попутного потоков мы можем пренебречь длинами всех судов (Рис. 2). Частные модели, учитывающие все характеристики судов, дают более громоздкие формулы.

2. Модель судов

Под судном, в общем случае, в нашей модели будет пониматься овал – прямоугольник с закруглёнными углами с радиусом закругления, равным полуширине судна (Рис. 3 а).

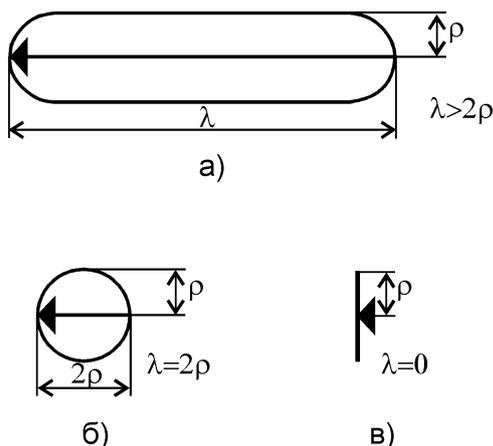


Рис. 3. Модель судна

Носом и кормой будут называться соответствующие закругления, а бортами – стороны овала. Отрезок, идущий по центру судна от кормы до носа, будем называть его осью. Стрелкой обозначены координаты судна и направление его движения. Сам овал будем

называть контуром судна. В моделях судов нулевой ширины контур вырождается в ось судна (Рис.1).

В таком виде судно может быть представлено только при $\lambda \geq 2^* \rho$, что мы всегда будем подразумевать, за единственным исключением судов нулевой длины.

При $\lambda = 2^* \rho$ контур судна превращается в окружность радиуса ρ (Рис.1 б). Такими контурами удобно моделировать неподвижные бакены, находящиеся в акватории.

В случае судов нулевой длины их моделью служит отрезок длиной $2^* \rho$, перпендикулярный направлению движения (Рис. 2 в).

Случаи $0 < \lambda < 2^* \rho$ будем считать запрещёнными в силу их неестественности.

Скорость, длину и полуширину нашего судна обозначим V , L и R соответственно, а все они в совокупности будут называться характеристиками нашего судна $\vec{H} = (V, L, R)$.

Случайные скорость, длину и полуширину прочих судов будем обозначать v , l и ρ соответственно, а их в совокупности – $\vec{\chi} = (v, l, \rho)$. Естественно, все они неотрицательные, хотя могут равняться 0 с ненулевой вероятностью.

Характеристики всех прочих судов независимы в совокупности и имеют одинаковую совместную функцию распределения $F_{\vec{\chi}}(\vec{h})$, где

$\vec{h} = (v, l, r)$. Обозначим их маргинальные функции распределения так:

$$F_v(v) = \iint_{\substack{l \geq 0 \\ r \geq 0}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \tag{1}$$

$$F_l(l) = \iint_{\substack{v \geq 0 \\ r \geq 0}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \tag{2}$$

$$F_\rho(r) = \iint_{\substack{v \geq 0 \\ l \geq 0}} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \tag{3}$$

$$F_{v,l}(v, l) = \int_{r \geq 0} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \tag{4}$$

$$F_{v,\rho}(v, r) = \int_{l \geq 0} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}), \tag{5}$$

$$F_{l,\rho}(l, r) = \int_{v \geq 0} dF_{\vec{\chi}}(\vec{h}). \tag{6}$$

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 $f_{\chi}^-(v, l, r)$, называемая плотностью распределения характеристик, что $F_{\chi}^-(\vec{h}) = \int_0^v \int_0^l \int_0^r f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw$ для любых $v \geq 0, l \geq 0, r \geq 0$, эти формулы могут быть переписаны в более привычном (но более громоздком) виде:

$$F_v(v) = \int_0^v \int_0^l \int_0^r f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw, \quad (7)$$

$$F_l(l) = \int_0^l \int_0^v \int_0^r f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw, \quad (8)$$

$$F_r(r) = \int_0^r \int_0^v \int_0^l f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw, \quad (9)$$

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

$$F_{v,r}(v, r) = \int_0^v \int_0^r \int_0^l f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw, \quad (11)$$

$$F_{l,r}(l, r) = \int_0^l \int_0^r \int_0^v f_{\chi}^-(w, m, s) ds dm dw. \quad (12)$$

Кроме того, маргинальные плотности распределения можно будет записать так:

$$f_v(v) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dr dl, \quad (13)$$

$$f_l(l) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dr dv, \quad (14)$$

$$f_r(r) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dl dv, \quad (15)$$

$$f_{v,l}(v, l) = \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dr, \quad (16)$$

$$f_{v,r}(v, r) = \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dl, \quad (17)$$

$$f_{l,r}(l, r) = \int_0^{\infty} f_{\chi}^-(v, l, r) dv. \quad (18)$$

В случае если скорости судов не зависят от их длин и ширин, $F_{\chi}^-(\vec{h}) = F_v(v) * F_{l,r}(l, r)$. Зависимость ширины судна от его длины мы всегда будем предполагать.

Потребуем существования математических ожиданий всех характеристик судов:

$$M_v = \int_{v \geq 0} v dF_v(v), \quad (19)$$

$$M_l = \int_{l \geq 0} l dF_l(l), \quad (20)$$

$$M_r = \int_{r \geq 0} r dF_r(r). \quad (21)$$

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

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.

3. Модель потока прочих судов

Вся акватория мирового океана в нашей модели будет представляться бесконечной плоскостью с декартовой системой координат. Вся модель начинает функционировать в момент времени $t = 0$.

Под координатами судна мы всегда будем понимать координаты центра его носа (на Рис.3 обозначены стрелками). Под фразой "судно находится в ...", будет пониматься "координаты судна находятся в ...".

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, $N = 0, 1, 2, \dots$, вычисляется по формуле Пуассона:

$$\frac{(I * S)^N}{N!} \exp\{-I * S\}. \quad (22)$$

2. Для любого количества K , $K = 2, 3, \dots$ 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.

Все прочие суда движутся против направления и параллельно оси x (Рис. 1, 2).

Подчеркнём три важнейшие характеристики нашей модели потока судов:

1. Независимость. Характеристики прочих судов независимы в совокупности, и не зависят от их координат.

2. Стационарность. Хотя характеристики всех судов и случайны, они неизменны во времени. Интенсивность поля прочих судов также не зависит от времени.

3. Однородность. Интенсивность поля прочих судов и распределение их характеристик, не зависят от их местонахождения в акватории.

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 и учесть 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 друг сквозь друга 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 делает 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

Выводы общих формул для опасности столкновения для обоих классов моделей идентичны, отличаясь лишь деталями, специфичными для каждого из классов. Поэтому, чтобы не загромождать выкладки, подробно будет рассмотрен случай неограниченного потока. Для фарватера мы ограничимся краткими замечаниями и конечным результатом.

Назовём опасностью столкновения функцию

$$D(\vec{H}, T) = -\ln \bar{P}(\vec{H}, T), \tag{23}$$

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

$$D(\vec{H}, T, Y) = -\ln \bar{P}(\vec{H}, T, Y). \tag{24}$$

Обозначим $\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T)$ область акватории такую, что суда, находящиеся в ней, и имеющие характеристики \vec{h} , обязательно столкнутся с нашим судном, имеющим характеристики \vec{H} , за период T . Её площадь будем обозначать $S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{h}, T)$.

Выберем прямоугольную область акватории $\Pi(X, Y)$ такую, что $-X \leq x \leq X$, и $-Y \leq y \leq Y$ (для фарватера $0 \leq y \leq Y$). Её площадь S_{Π} будет равна $4 * X * Y$ (для фарватера – $2 * X * Y$).

Предположим, что нам известно, что некоторое судно, выделенное из прочих, с характеристиками \vec{h} находится в прямоугольнике $\Pi(X, Y)$, но точные его координаты нам не известны. Требуется найти вероятность $P_1(\vec{H}, \vec{h}, T)$ столкновения с ним нашего судна за время T (вероятность избежать столкновения – $\bar{P}_1(\vec{H}, \vec{h}, T) = 1 - P_1(\vec{H}, \vec{h}, T)$). Нижний индекс 1 этой вероятности означает, что это вероятность столкновения с одним судном.

В силу пуассоновости поля судов координаты выделенного судна есть двумерная случайная величина, равномерно распределённая в области $\Pi(X, Y)$, с плотностью распределения S_{Π}^{-1} [1].

Поэтому вероятность столкновения

$$P_1(\vec{H}, \vec{h}, T) = S_{\Pi}^{-1} * S\{\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T) \cap \Pi(X, Y)\}. \tag{25}$$

Положим теперь, что и характеристики выделенного судна нам не известны. Тогда вероятность столкновения по формуле полной вероятности будет

$$P_1(\vec{H}, T) = S_{\Pi}^{-1} * \iiint_{v \geq 0, l \geq 0, r \geq 0} S\{\Xi(\vec{H}; \vec{h}, T) \cap \Pi(X, Y)\} dF_{\vec{z}}(\vec{h}). \tag{26}$$

Если же в прямоугольнике $\Pi(X, Y)$ находятся N судов с неизвестными координатами и характеристиками, то, в силу независимости всех случайных величин, вероятность избежать

столкновения нашего судна с любым из этих судов будет равна $\overline{P}_N(\vec{H}, T) = (\overline{P}_1(\vec{H}, T))^N$.

Теперь предположим, что нам не известно и количество судов, находящихся в указанном прямоугольнике, т.е. оно случайно. В силу пуассоновости поля судов по формуле полной вероятности мы получаем следующую вероятность избежать столкновения с ними:

$$\begin{aligned} \overline{P}(\vec{H}, T) &= \exp\{-I * S_{\Pi}\} * \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(I * S_{\Pi})^N}{N!} * \overline{P}_N(\vec{H}, T) = \\ &= \exp\{-I * S_{\Pi}\} * \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(I * S_{\Pi} * \overline{P}_1(\vec{H}, T))^N}{N!} = \\ &= \exp\{-I * S_{\Pi} * (1 - \overline{P}_1(\vec{H}, T))\} = \\ &= \exp\{-I * S_{\Pi} * P_1(\vec{H}, T)\} = \\ &= \exp\left\{-I * \iint_{v \geq 0, l \geq 0, r \geq 0} S\{\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T) \cap \Pi(X, Y)\} dF_{\vec{h}}(\vec{h})\right\}. \end{aligned} \quad (27)$$

Поскольку величины X и Y были нами выбраны произвольно (для фарватера Y фиксирована), то, устремляя их к бесконечности (для фарватера – только X), мы получим

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{X \rightarrow \infty \\ Y \rightarrow \infty}} S\{\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T) \cap \Pi(X, Y)\} = \\ = S\{\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T)\} = S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{h}, T). \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, вероятность избежать столкновения с любым из прочих судов:

$$\begin{aligned} \overline{P}(\vec{H}, T) &= \exp\left\{-I * \iint_{v \geq 0, l \geq 0, r \geq 0} S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{h}, T) dF_{\vec{h}}(\vec{h})\right\} = \\ &= \exp\left\{-I * M(S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T))\right\}, \end{aligned} \quad (29)$$

а опасность столкновения:

$$D(\vec{H}, T) = I * M(S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T)). \quad (30)$$

Здесь $M(S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T))$ обозначает математическое ожидание случайной площади $S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T)$.

Совершенно аналогично для фарватера:

$$\overline{P}(\vec{H}, T, Y) = \exp\left\{-I * M(S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T, Y))\right\}, \quad (31)$$

$$D(\vec{H}, T, Y) = I * M(S_{\Xi}(\vec{H}, \vec{\chi}, T, Y)). \quad (32)$$

6. Пересечение фарватера под прямым углом

Предположим, что нашему судну требуется под прямым углом пересечь фарватер (Рис. 1). Ширина всех судов – нулевая. Это оправдывается тем, что ширина судов существенно меньше их длины, и в нашей, сильно упрощённой модели, её влияние может быть легко учтено небольшим удлинением оси по сравнению с реальной длиной судна. Кроме того, мы всегда будем предполагать, что ширина фарватера больше длины нашего судна ($L < Y$).

Нам надо определить область $\Xi(\vec{H}, \vec{h}, T, Y)$, где $\vec{H} = (V, L, 0)$ и $\vec{h} = (v, l, 0)$, и 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 первого и второго 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, y) . Очевидно, что столкновение может произойти только в точке $(0, y)$, которую будем называть точкой пересечения курсов. Определим следующие моменты прохождения точки пересечения:

носом нашего судна

$$t_{H,H} = y/V, \quad (33)$$

носом выделенного судна

$$t_{B,H} = x/v, \quad (34)$$

кормой нашего судна

$$t_{H,K} = (y+L)/V, \quad (35)$$

кормой выделенного судна

$$t_{B,K} = (x+l)/v. \quad (36)$$

Условиями тарана первого типа будут

$$t_{B,H} < t_{H,H} < t_{B,K}, \quad (37)$$

т.е. нос нашего судна попадает в точку пересечения позже носа, но ранее кормы выделенного судна.

Условиями тарана второго типа будут

$$t_{H,H} < t_{B,H} < t_{H,K}, \quad (38)$$

т.е. нос выделенного судна попадает в точку пересечения позже носа, но ранее кормы нашего судна.

Условиями пограничных событий будут:

$$t_{H,H} = t_{B,K} \text{ для касания первого типа,}$$

$$t_{H,H} = t_{B,H} \text{ для тарана «нос-в-нос»,}$$

$$t_{H,K} = t_{B,H} \text{ для касания второго типа.}$$

Подставляя в условия (37) и (38) определения соответствующих моментов (33)-(36), получим $x/v < y/V < (x+l)/v$ для тарана первого типа и $y/V < x/v < (y+L)/V$ для тарана второго типа.

Перепишем оба эти условия следующим образом:

$$k * x < y < k * x + k * l, \tag{39}$$

$$k * x - L < y < k * x, \tag{40}$$

где $k = V/v$. Условиями пограничных событий будут:

- a. $y = k * x + k * l$ для касания первого типа,
- b. $y = k * x$ для тарана «нос-в-нос»,
- c. $y = k * x - L$ для касания второго типа.

Рассмотрим сначала случай полного пересечения фарватера нашим судном за время T , то есть $(Y+L)/V \leq T$. Эти три наклонные параллельные прямые делят акваторию фарватера на четыре области (Рис. 4).

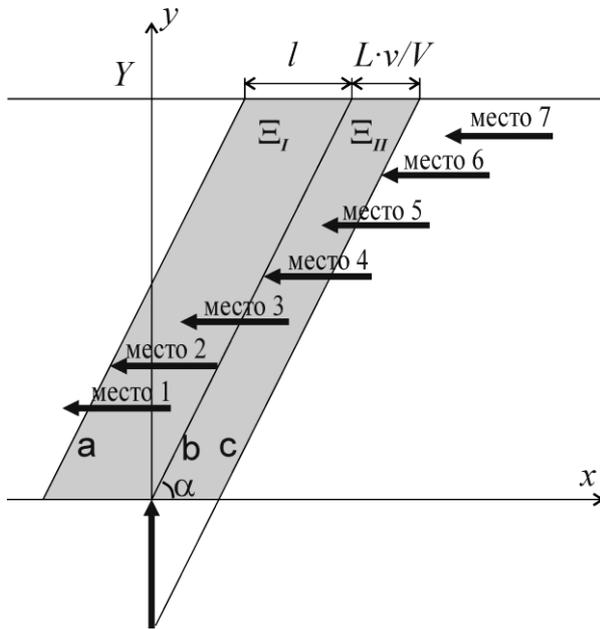


Рис. 4. Влияние местоположения выделенного судна на результат пересечения фарватера нашим судном ($R = 0, \rho \equiv 0$)

Здесь угол $\alpha = \arctan(V/v)$, область Ξ_I ограничена прямыми a и b и границами фарватера, область Ξ_{II} ограничена прямыми b и c и границами фарватера (на рисунке закрашены серым цветом), их площади $S_{\Xi_I} = Y * l$ и $S_{\Xi_{II}} = Y * L * v/V$.

На рисунке показано семь возможных местоположений выделенного судна, принципиально различающихся по результатам пересечения фарватера нашим судном, приведённым в таблице 1.

Резюмируя: если выделенное судно находится в области Ξ_I или Ξ_{II} , произойдёт таран первого или второго типов соответственно. В противном случае столкновения не будет.

Таким образом, $\Xi = \Xi_I \cup \Xi_{II}$ и

$S_{\Xi} = S_{\Xi_I} + S_{\Xi_{II}}$, а опасность столкновения

$$D(\vec{H}, T, Y) = I * M(Y * \lambda + Y * L * v/V) = I * Y * (M_{\lambda} + L * M_v/V). \tag{41}$$

Рассмотрим теперь случаи неполного пересечения фарватера нашим судном за время T , то есть $T < (Y+L)/V$.

Таблица 1

Сценарии пересечения фарватера

Место	Характеристика места выделенного судна	Результат
1	Нос находится левее прямой a.	Нос нашего судна пройдёт позади кормы выделенного. Столкновения не будет.
2	Корма касается прямой b (соответственно, нос касается прямой a).	Касание первого типа.
3	Нос находится внутри области Ξ_I .	Таран первого типа.
4	Нос касается прямой b.	Таран «нос-в-нос».
5	Нос находится внутри области Ξ_{II} .	Таран второго типа.
6	Нос касается прямой c.	Касание второго типа.
7	Нос находится правее прямой c.	Нос выделенного судна пройдёт позади кормы нашего. Столкновения не будет.

Очевидно, что к условиям таранов (37) и (38) добавляются ещё два: $t_{HH} < T$ – наше судно успевает за время T прийти в точку столкновения; $t_{BH} < T$ – выделенное судно успевает за время T прийти в точку столкновения; или, после подстановки определений соответствующих моментов, $y < V * T$; $x < v * T$.

На Рис. 5 изображены возможные конфигурации областей Ξ_I и Ξ_{II} , соответствующих трём интервалам значений T :

1. $0 \leq T_1 < L/V$ – контур нашего судна за время T_1 успевает проникнуть в акваторию фарватера лишь частично;
2. $L/V \leq T_2 < Y/V$ – контур нашего судна за время T_2 успевает проникнуть в акваторию фарватера полностью, его координаты остаются в пределах акватории;
3. $Y/V \leq T_3 < (Y+L)/V$ – контур нашего судна за время T_3 успевает частично покинуть акваторию.

Вертикальные прямые 1-3 имеют абсциссы $v * T_1$, $v * T_2$ и $v * T_3$ соответственно.

Горизонтальные прямые 1 и 2 имеют ординаты $V * T_1$ и $V * T_2$ соответственно.

В первом случае область Ξ_I ограничена по оси абсцисс прямыми а и b, а по оси ординат – осью x и горизонтальной прямой 1. Её площадь равна $l * V * T_1$. Область Ξ_{II} представляет собой треугольник, образуемый прямой b (гипотенуза) и осью x и вертикальной прямой 1 (катеты). Её площадь равна половине произведения её катетов $v * V * T_1^2 / 2$.

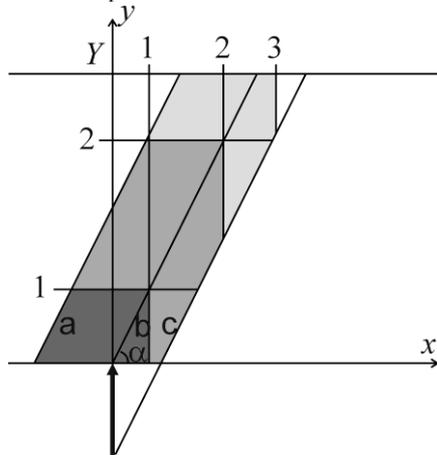


Рис. 5. Возможные конфигурации областей Ξ_I и Ξ_{II}

Во втором случае область Ξ_I ограничена по оси абсцисс прямыми а и b, а по оси ординат – осью x и горизонтальной прямой 2. Её площадь равна $l * V * T_2$. Область Ξ_{II} представляет собой трапецию, образуемую прямыми b и c, осью x и вертикальной прямой 2. Её площадь будет равна площади параллелограмма, образуемого осью x и горизонтальной прямой 2 по оси ординат и прямыми b и c по оси абсцисс (то есть $(L * v / V) * (V * T_2)$), за вычетом площади треугольника, образуемого прямой c, вертикальной прямой 2 и горизонтальной прямой 2 (то есть $L * (L * v / V) / 2$). Таким образом,

$$S_{\Xi_{II}} = (L * v / V) * (V * T - L / 2). \quad (42)$$

В третьем случае область Ξ_I ограничена по оси абсцисс прямыми а и b, а по оси ординат – границами фарватера. Её площадь равна $l * Y$. Область Ξ_{II} представляет собой пятиугольник, образуемый границами фарватера, прямыми b и c, и вертикальной прямой 3. Её площадь будет равна площади параллелограмма, образуемого границами фарватера и прямыми b и c (то есть $(L * v / V) * Y$), за вычетом площади треугольника, образуемого верхней границей фарватера, прямой c и вертикальной прямой 3 (то есть $((Y + L) * v / V - v * T)^2 * V / (2 * v)$). Таким образом,

$$S_{\Xi_{II}} = Y * (L * v / V) - \left((Y + L) * v / V - v * T \right)^2 * V / (2 * v). \quad (43)$$

Объединяя все три случая, получаем для области Ξ_I

$$S_{\Xi_I} = l * \min(V * T, Y) \quad (44)$$

при любых $T \geq 0$, а для области Ξ_{II}

$$S_{\Xi_{II}} = \begin{cases} v * V * T^2 / 2 \text{ при } 0 \leq T < L / V, \\ (L * v / V) * (V * T - L / 2) \text{ при } L / V \leq T < Y / V, \\ Y * (L * v / V) - ((Y + L) * v / V - v * T)^2 * V / (2 * v) \text{ при } Y / V \leq T < (Y + L) / V. \end{cases} \quad (45)$$

Введём функцию

$$m(\vec{H}, T, Y) = \begin{cases} V * T^2 / 2 \text{ при } 0 \leq T < L / V, \\ L * (V * T - L / 2) / V \text{ при } L / V \leq T < Y / V, \\ Y * L / V - ((Y + L) / V - T)^2 * V / 2 \text{ при } Y / V \leq T < (Y + L) / V, \\ Y * L / V \text{ при } (Y + L) / V \leq T. \end{cases} \quad (46)$$

Тогда, принимая во внимание полученный ранее результат для полного пересечения фарватера,

$$D(\vec{H}, T, Y) = I * M(\min(V * T, Y) * \lambda + m(\vec{H}, T, Y) * v) = I * (\min(V * T, Y) * M_\lambda + m(\vec{H}, T, Y) * M_v) \quad (47)$$

при любых значениях $0 \leq T$, $0 < V$, $0 < L$ и $L < Y$.

Результаты расчета представлены на рис. 6, при этом считалось, что плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов $I = 1$ милиа⁻², ширина фарватера $Y = 0,5$ мили, математические ожидания длин и скоростей прочих судов $M_\lambda = 150$ м и $M_v = 7,5$ уз соответственно, длина нашего судна $L = 180$ м, скорость нашего судна V варьировалась.

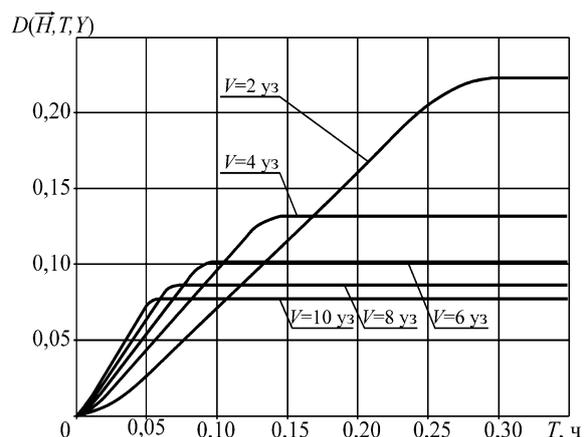


Рис. 6. Опасность столкновения при пересечении фарватера под прямым углом

Видно, что с уменьшением скорости нашего судна опасность его столкновения с прочими судами при пересечении фарватера растёт.

7. Пересечение фарватера под произвольным углом

Предположим, что нашему судну требуется пересечь фарватер, на этот раз – под произвольным углом φ , (Рис. 7). Поскольку в диапазоне $\pi/4 \leq \varphi \leq 3\pi/4$ влияние ширины судна на вероятность столкновения остаётся незначительным, мы по-прежнему будем считать (в указанном диапазоне углов) ширины всех судов нулевыми. Все определения и обозначения предыдущего раздела остаются в силе.

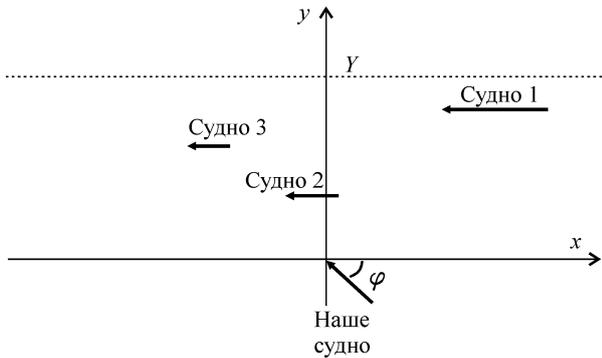


Рис. 7 Пересечение фарватера под произвольным углом ($R = 0, \rho \equiv 0$).

Заметим, что продольной и поперечной (относительно потока) составляющими скорости нашего судна будут $V \cdot \cos(\varphi)$ и $V \cdot \sin(\varphi)$ соответственно.

Рассматривать мы будем только случай полного пересечения фарватера нашим судном за время T , то есть $(Y + L)/(V \cdot \sin(\varphi)) \leq T$.

В этом случае точкой пересечения будет $(-y \cdot \text{ctg}(\varphi), y)$, при этом

$$t_{H,H} = y / (V \cdot \sin(\varphi)), \quad (48)$$

$$t_{B,H} = (x + y \cdot \text{ctg}(\varphi)) / v, \quad (49)$$

$$t_{H,K} = (y + L) / (V \cdot \sin(\varphi)), \quad (50)$$

$$t_{B,K} = (x + l + y \cdot \text{ctg}(\varphi)) / v. \quad (51)$$

Далее, повторяя по шагам все рассуждения предыдущего раздела, получим, что при $v \neq V \cdot \cos(\varphi)$ условиями пограничных событий будут:

a. $y = k \cdot x + k \cdot l$ – для касания первого типа,

b. $y = k \cdot x$ – для тарана «нос-в-нос»,

c. $y = k \cdot x - L \cdot v / (v - V \cdot \cos(\varphi))$ – для касания второго типа,

где $k = V \cdot \sin(\varphi) / (v - V \cdot \cos(\varphi))$.

При $v = V \cdot \cos(\varphi)$, то есть, при совпадении скорости v с продольной составляющей скорости нашего судна, граничные прямые становятся вертикальными:

a. $x = -l$ – для касания первого типа,

b. $x = 0$ – для тарана «нос-в-нос»,

c. $x = L \cdot v / (V \cdot \sin(\varphi))$ – для касания второго типа.

В любом случае площади $S_{\Xi_I} = Y \cdot l$, $S_{\Xi_{II}} = Y \cdot L \cdot v / (V \cdot \sin(\varphi))$, а опасность столкновения

$$D(\vec{H}, T, Y) = I \cdot M(Y \cdot \lambda + Y \cdot L \cdot v / (V \cdot \sin(\varphi))) = (52)$$

$$= I \cdot Y \cdot (M_\lambda + L \cdot M_v / (V \cdot \sin(\varphi))).$$

Расчетные зависимости представлены на рис. 8. Расчет выполнялся для следующих данных: угол пересечения фарватера нашим судном $\varphi = \pi/4$, ширина фарватера $Y = 3$ мили, математические ожидания длин и скоростей прочих судов $M_\lambda = 150$ м и $M_v = 7,5$ уз соответственно, длина нашего судна $L = 180$ м, скорость нашего судна V варьировалась.

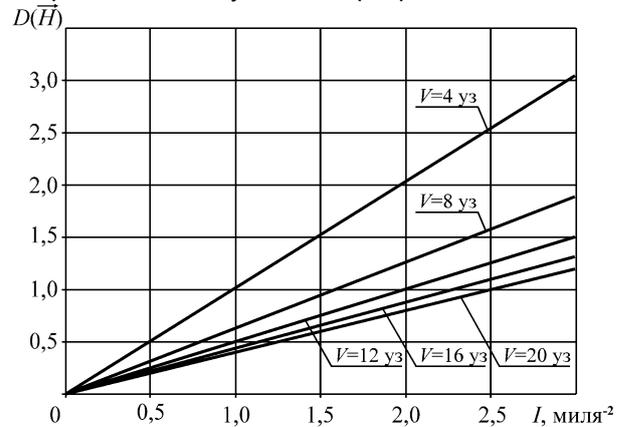


Рис. 8. Опасность столкновения при пересечении фарватера под произвольным углом

Видно, что с ростом скорости нашего судна опасность столкновения снижается, что связано с уменьшением времени нахождения нашего судна в зоне фарватера, где может произойти столкновение. Также на опасность столкновения существенное влияние оказывает плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов.

8. Пересечение под прямым углом фарватера широким судном

Усложним модель раздела 5, предположив ширину нашего судна ненулевой. Соответственно изменятся результаты пересечения фарватера нашим судном в зависимости от местоположения выделенного судна (Рис. 9). Рассматриваться будет только случай полного пересечения фарватера нашим судном за время T .

Здесь область Ξ_I ограничена прямыми a' и b и границами фарватера, область Ξ_{II} – прямыми b и c' и границами фарватера (на рисунке закрашены серым цветом). Рассмотрим детально случай касания кормы нашего судна выделенным (Место б', Рис. 9).

Длины отрезков:

$$|AB| = |AD| = R, \quad (53)$$

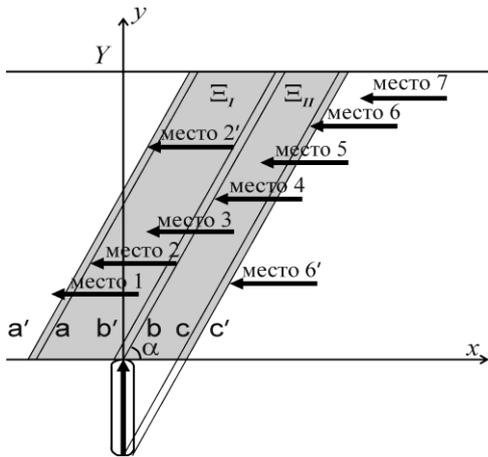


Рис. 9. Влияние местоположения выделенного судна на результат пересечения фарватера нашим судном ($R > 0, \rho \equiv 0$).

$$|BC| = R * V / v, \tag{54}$$

$$|AC| = \sqrt{|AB|^2 + |BC|^2} = R * \sqrt{(V/v)^2 + 1}. \tag{55}$$

Таблица 2

Сценарии пересечения фарватера широким судном

Место	Характеристики места выделенного судна	Результат
1	Нос находится левее прямой a'.	Столкновения не будет.
2'	Корма касается прямой b' (соответственно, нос касается прямой a').	Касание первого типа.
2, 3	Нос находится левее b и правее a'.	Таран в корму, борт или нос выделенного судна.
4	Нос касается b.	Таран «нос-в-нос».
5,6	Нос находится левее c' и правее b.	Таран в корму, борт или нос нашего судна.
6'	Нос касается c'.	Касание второго типа.
7	Нос находится правее c'.	Столкновения не будет.

Прямая c' пройдёт ниже прямой c на длину отрезка $|CD| = |AC| - |AD| = R * (\sqrt{(V/v)^2 + 1} - 1)$, или, что то же самое, правее неё на величину

$$|DE| = |CD| * v / V = R * (\sqrt{(v/V)^2 + 1} - v/V). \tag{56}$$

В силу симметрии носа и кормы нашего судна прямые a' и b' пройдут левее соответствующих прямых a и b на эту же величину. Следовательно, площади областей Ξ_I и Ξ_{II} увеличились, по сравнению со случаем $R \equiv 0$, на одну и ту же величину $Y * R * (\sqrt{v^2/V^2 + 1} - v/V)$.

Введём функции

$$h(s) = \sqrt{s^2 + 1} - 1, \tag{57}$$

$$g(s) = \sqrt{s^2 + 1} - s. \tag{58}$$

Тогда уравнения новых прямых можно будет записать следующим образом:

$$a'. y = k * x + k * l + R * h(k),$$

$$b'. y = k * x + R * h(k),$$

$$c'. y = k * x - L - R * h(k),$$

где $k = V/v$, площади

$$S_{\Xi_I} = Y * l + Y * R * g(v/V), \tag{59}$$

$$S_{\Xi_{II}} = Y * L * v/V + Y * R * g(v/V), \tag{60}$$

а опасность столкновения

$$D(\bar{H}, T, Y) = I * M(Y * \lambda + Y * L * v/V + 2 * Y * R * g(v/V)) = I * Y * (M_{\lambda} + L * M_v/V + 2 * R * M(g(v/V))), \tag{61}$$

где $M(g(v/V))$ обозначает математическое ожидание случайной величины $g(v/V)$.

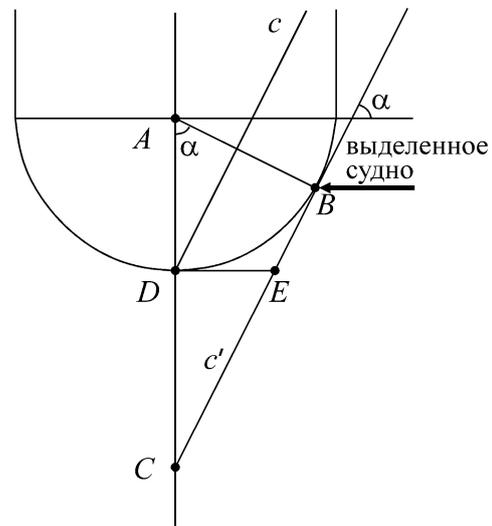


Рис. 10. Геометрия касания кормы нашего судна выделенным судном ($R > 0, r \equiv 0$)

Пусть существует функция $f_{\chi}(v, l, r)$, определяющая плотность распределения характеристик судов. Тогда

$$M(g(v/V)) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g(v/V) \cdot f_{\chi}(v, l, r) \cdot dv dl dr. \tag{62}$$

В первом приближении можно считать скорости судов не зависящими от их длин и ширин, поэтому

$$M(g(v/V)) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g(v/V) \cdot f_v(v) \cdot f_{\lambda, \rho}(l, r) \cdot dv dl dr = \int_0^{\infty} g(v/V) \cdot f_v(v) \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\lambda, \rho}(l, r) \cdot dl dr = \int_0^{\infty} g(v/V) \cdot f_v(v) \cdot dv. \tag{63}$$

В соответствии с [8] можно считать, что скорости прочих судов имеют Гамма-распределение:

$$f_v(v) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} v^{a-1} e^{-bv}, \quad v \geq 0, \quad (64)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма-функция:

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1} e^{-x} dx. \quad (65)$$

Физический смысл параметров a и b состоит в том, что $M_v = ab^{-1}$, а дисперсия скоростей прочих судов равна ab^{-2} .

Таким образом,

$$\begin{aligned} M(g(v/V)) &= \int_0^\infty g(v/V) \cdot f_v(v) dv = \\ &= \int_0^\infty \left(\sqrt{(v/V)^2 + 1} - v/V \right) \cdot f_v(v) dv = \\ &= -\frac{M_v}{V} + \int_0^\infty \sqrt{(v/V)^2 + 1} \cdot \frac{b^a}{\Gamma(a)} v^{a-1} e^{-bv} dv = \\ &= -\frac{M_v}{V} + \frac{(b \cdot V)^a}{\Gamma(a)} \cdot \int_0^\infty \sqrt{s^2 + 1} \cdot s^{a-1} e^{-bV \cdot s} ds, \end{aligned} \quad (66)$$

где $s = v/V$.

На рис. 11 представлены результаты расчета для следующих данных: параметры Гамма-распределения прочих судов $a = 15$ и $b = 2 \text{ уз}^{-1}$, плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов I варьировалась. Также принималось, что ширина фарватера $Y = 3$ мили, длина нашего судна и его полуширина $L = 180$ м и $R = 10$ м соответственно.

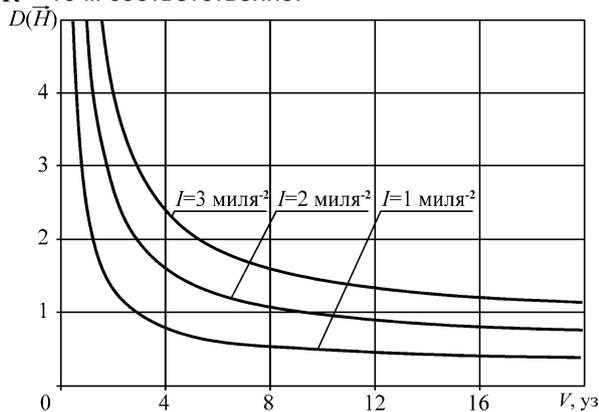


Рис. 11. Опасность столкновения при пересечении фарватера широким судном

Рисунок показывает, что с увеличением скорости нашего судна опасность столкновения уменьшается, причем резкое снижение наблюдается до достижения скоростью V значения 4–8 узлов в зависимости от плотности интенсивности пуассоновского поля прочих судов.

9. Пересечение под прямым углом фарватера с широкими судами

Ещё более усложним модель раздела 5, предположив не нулевыми и ширины прочих судов. Опять ограничимся только случаем полного пересечения фарватера нашим судном за время T .

Рисунок, иллюстрирующий данную модель, вполне аналогичен Рис. 9, только вместо прямых a' и c' появятся параллельные им прямые a'' и c'' , левее и правее a' и c' соответственно. Область Ξ_I будет ограничена – прямыми a'' , b и границами фарватера, область Ξ_{II} – прямыми b , c'' и границами фарватера.

Геометрия расширения области Ξ_{II} показана на Рис. 12.

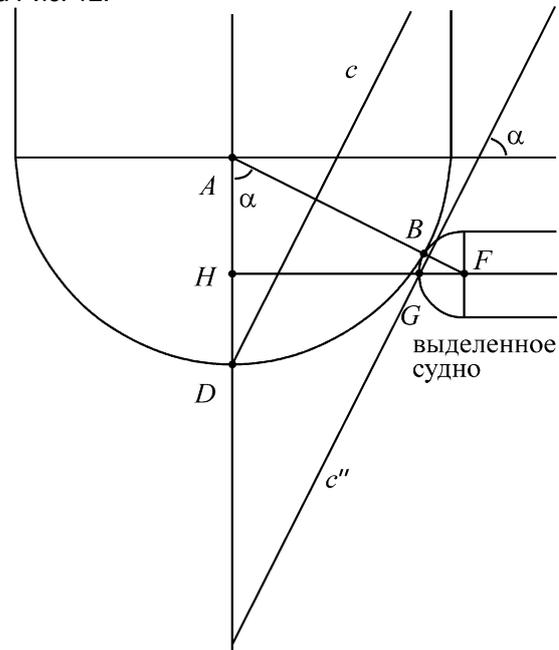


Рис. 12. Геометрия касания кормы нашего судна выделенным судном ($R > 0, r > 0$)

Здесь выделенное судно касается кормы нашего в той же точке B , что и на Рис.10, однако, точка G , обозначающая его координаты, при этом находится ниже B . В условиях раздела 7 это означало бы безаварийное расхождение судов. Следовательно, границей области Ξ_{II} стала прямая c'' , параллельная прямой c (и всем прочим разделяющим прямым), и проходящая через нос выделенного судна:

$$y = k * x + Q, \quad (67)$$

где $k = V/v$, константу Q предстоит вычислить. Для этого найдём координаты (x_K, y_K) выделенного судна (точки G) в момент касания.

Ордината точки A равна $-(L-R)$, следовательно, ордината точки H , а вместе с ней и точки G , будет равна $-(L-R) - |AH|$. Но,

$$|AH| = |AF| \cdot \cos(\alpha) \quad \text{и} \quad |AF| = R + r.$$

Следовательно, ордината выделенного судна $y_K = -(L - R) - (R + r) \cdot \cos(\alpha)$. (68)

Абсцисса же точки G будет равна $|GH| = |FH| - |FG|$. Поскольку $|FH| = |AF| \cdot \sin(\alpha)$ и $|FG| = r$,

$$x_K = (R + r) \cdot \sin(\alpha) - r. \quad (69)$$

Подставив полученные значения в уравнение прямой с", и разрешив уравнение относительно Q, получим:

$$Q = -(L - R) - (R + r) \cdot \cos(\alpha) - k \cdot ((R + r) \cdot \sin(\alpha) - r). \quad (70)$$

Поскольку $k = V/v$, $\sin(\alpha) = \frac{V}{\sqrt{V^2 + v^2}}$ и

$$\cos(\alpha) = \frac{v}{\sqrt{V^2 + v^2}}, \text{ то}$$

$$\begin{aligned} Q &= -L + R - (R + r) \cdot \left(\frac{v}{\sqrt{V^2 + v^2}} + \frac{V}{v} \cdot \frac{V}{\sqrt{V^2 + v^2}} \right) + \frac{V}{v} \cdot r = \\ &= -L + R - (R + r) \cdot \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{v^2}{\sqrt{V^2 + v^2}} + \frac{V^2}{\sqrt{V^2 + v^2}} \right) + \frac{V}{v} \cdot r = \quad (71) \\ &= -L + R - (R + r) \cdot \sqrt{V^2 + v^2} / v + V \cdot r / v = \\ &= -L - R \cdot \left(\sqrt{(V/v)^2 + 1} - 1 \right) - r \cdot \left(\sqrt{(V/v)^2 + 1} - (V/v) \right). \end{aligned}$$

Ширина области Ξ_{II} по оси x будет равна абсциссе точки $(x_0, 0)$ пересечения прямой с" с осью x:

$$\begin{aligned} 0 &= (V/v) \cdot x_0 - L - R \cdot \left(\sqrt{(V/v)^2 + 1} - 1 \right) - \\ &- r \cdot \left(\sqrt{(V/v)^2 + 1} - (V/v) \right). \quad (72) \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} x_0 &= L \cdot (v/V) + R \cdot \left(\sqrt{(v/V)^2 + 1} - v/V \right) + \\ &+ r \cdot \left(\sqrt{(v/V)^2 + 1} - 1 \right). \quad (73) \end{aligned}$$

Следовательно, прямая с" пройдет правее прямой с на $R \cdot g(v/V) + r \cdot h(v/V)$. Аналогично появляется новая граница а" области Ξ_I , проходящая левее прямой а на ту же самую величину. Площади

$$S_{\Xi_I} = Y \cdot (l + R \cdot g(v/V) + r \cdot h(v/V)), \quad (74)$$

$$S_{\Xi_{II}} = Y \cdot (L \cdot (v/V) + R \cdot g(v/V) + r \cdot h(v/V)). \quad (75)$$

Окончательно:

$$\begin{aligned} D(\vec{H}) &= I \cdot Y \cdot (M_\lambda + L \cdot M_v / V + \\ &+ 2 \cdot R \cdot M(g(v/V)) + 2 \cdot M(\rho \cdot h(v/V))). \quad (76) \end{aligned}$$

где, опять-таки, буква M перед выражением в скобках означает взятие математического

ожидания случайных величин $g(v/V)$ и $\rho \cdot h(v/V)$.

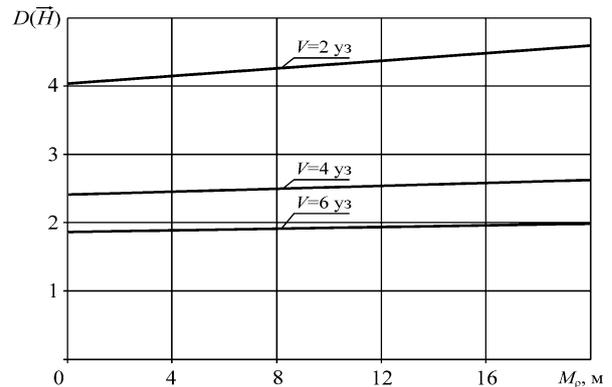


Рис. 13. Опасность столкновения при пересечении фарватера с широкими судами

В силу независимости случайных величин ρ и u

$$\begin{aligned} M(\rho \cdot h(v/V)) &= M(\rho) \cdot M(h(v/V)) = \\ &= M_\rho \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h(v/V) \cdot f_z(v, l, r) \cdot dv dl dr = \\ &= M_\rho \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty h(v/V) \cdot f_v(v) \cdot f_{\lambda, \rho}(l, r) \cdot dv dl dr = \\ &= M_\rho \cdot \int_0^\infty h(v/V) \cdot f_v(v) \cdot dv \cdot \int_0^\infty \int_0^\infty f_{\lambda, \rho}(l, r) \cdot dl dr = \quad (77) \\ &= M_\rho \cdot \int_0^\infty h(v/V) \cdot f_v(v) \cdot dv = \\ &= M_\rho \cdot \int_0^\infty \left(\sqrt{(v/V)^2 + 1} - 1 \right) \cdot \frac{b^a}{\Gamma(a)} \cdot v^{a-1} \cdot e^{-b \cdot v} \cdot dv = \\ &= -M_\rho + M_\rho \cdot \int_0^\infty \sqrt{(v/V)^2 + 1} \cdot \frac{b^a}{\Gamma(a)} \cdot v^{a-1} \cdot e^{-b \cdot v} \cdot dv = \\ &= -M_\rho + \frac{M_\rho \cdot (b \cdot V)^a}{\Gamma(a)} \cdot \int_0^\infty \sqrt{s^2 + 1} \cdot s^{a-1} \cdot e^{-b \cdot V \cdot s} \cdot ds. \end{aligned}$$

Результаты расчета представлены на рис. 13. При этом использовались следующие исходные данные: параметры Гамма-распределения прочих судов $a = 15$ и $b = 2$ уз⁻¹, плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов $I = 3$ милья⁻², ширина фарватера $Y = 3$ мили, длина нашего судна и его полуширина $L = 180$ м и $R = 10$ м соответственно, скорость нашего судна V варьировалась.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на опасность столкновения математическое ожидание ширины прочих судов оказывает при малых значениях скорости нашего судна.

10. Движение в потоке встречных судов

Рассмотрим теперь модель движения нашего судна в неограниченном потоке встречных судов в течение некоторого интервала времени T (Рис. 2).

Мы не будем касаться проблем сложного гидродинамического взаимодействия корпусов судов при встречном расхождении, поэтому положим длины всех судов нулевыми ($L = 0, \lambda \equiv 0$). При этом под полушириной судна, не меняя терминологии, мы будем понимать полуширину зоны безопасности вокруг судна, нарушение которой грозит реальным столкновением со встречным судном из-за возникающих гидродинамических сил присасывания. Согласно [6], полуширина такой зоны зависит, в том числе, и от длины судна и может превышать полуширину судна в семь и более раз.

Для столкновения с выделенным судном с характеристиками $\chi = (v, 0, r)$ требуется, во-первых, чтобы суда были достаточно близки по оси x , то есть $x \leq T^*(V + v)$, иначе они просто не успеют прийти друг до друга. Во-вторых, они должны быть достаточно близки по оси y , то есть $|y| \leq R + r$, иначе они просто разойдутся, даже не коснувшись бортами. Поэтому

$$S_{\Xi} = 2 * T^*(V + v) * (R + r). \text{ Окончательно:} \\ D(\vec{H}, T) = I * M(2 * T^*(V + v) * (R + \rho)) = \\ = 2 * I * T^*(R * V + R * M_v + V * M_{\rho} + M(v * \rho)), \quad (78)$$

где $M(v * \rho)$ обозначает математическое ожидание произведения случайных величин v и ρ .

Если известно, что скорости встречных судов не зависят от их ширины, то $M(v * \rho) = M_v * M_{\rho}$, и функцию опасности столкновения можно упростить:

$$D(\vec{H}) = 2 * I * T^*(V + M_v) * (R + M_{\rho}). \quad (79)$$

На рис. 15 представлены результаты расчета для следующих исходных данных: плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов $I = 1$ миль², полуширина нашего судна $R = 10$ м, математические ожидания полуширин и скоростей прочих судов $M_{\rho} = 12$ м и $M_v = 7,5$ уз соответственно, временной интервал $T = 1$ ч.

11. Движение в потоке попутных судов

Рассмотрим теперь модель движения нашего судна в неограниченном потоке попутных судов в течение некоторого интервала времени T (Рис. 8).

Как и в предыдущем разделе, мы положим длины всех судов нулевыми. При этом мы имеем в виду, что для попутного потока судов проблема гидродинамических сил присасывания, согласно [6], только усугубляется, и полуширина зоны

безопасности судов должна быть ещё больше, чем в случае встречного потока.

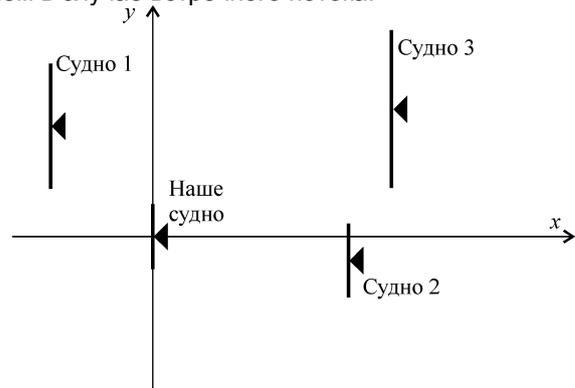


Рис. 14. Движение в потоке попутных судов

Очевидно, что столкновение заключается в том, что

1. либо наше судно таранит в корму судно, находящееся в момент времени $t = 0$ впереди нашего, но идущее с более низкой скоростью,
2. либо судно, находящееся в момент времени $t = 0$ позади нашего, но идущее с более высокой скоростью, таранит нас в корму.

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

Условиями тарана I-го типа будут

$$v < V, T^*(v - V) \leq x \leq 0, \quad (80)$$

иначе за время T мы не догоним выделенное судно, а тарана II-го типа –

$$v > V, 0 \leq x \leq T^*(v - V), \quad (81)$$

иначе выделенное судно за время T не догонит наше.

Кроме того, аналогично случаю потока встречных судов, условием столкновения любого типа для координаты y является $|y| \leq r + R$.

Поэтому

$$S_{\Xi} = \begin{cases} 2 * T^*(V - v) * (R + r), & V > v, \\ 2 * T^*(v - V) * (R + r), & V < v, \end{cases} = \\ = 2 * T^* |v - V| * (R + r). \quad (82)$$

Следовательно,

$$D(\vec{H}, T) = I * M(2 * T^* |v - V| * (\rho + R)) = \\ = 2 * I * T^* M(|v - V| * (\rho + R)). \quad (83)$$

В случае независимости скоростей и ширин попутных судов эта формула упрощается:

$$D(\vec{H}, T) = 2 * I * T^*(R + M_{\rho}) * M(|v - V|), \quad (84)$$

где $M(|v - V|)$ обозначает математическое ожидание случайной величины $|v - V|$.

Результаты расчета представлены на рис. 15 для тех же исходных данных, что и в предыдущем разделе, за исключением того, что скорости прочих судов считались распределенными по закону (64) с параметрами $a = 15$ и $b = 2 \text{ уз}^{-1}$.

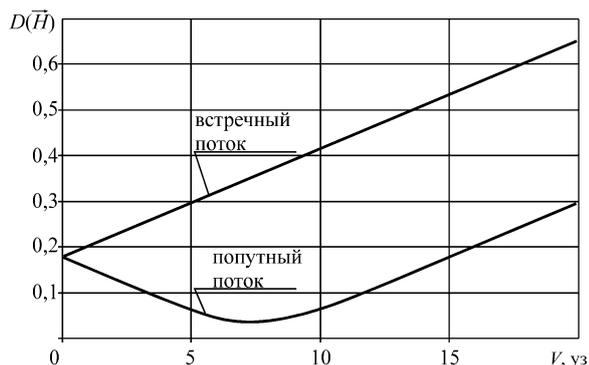


Рис. 15. Опасность столкновения при движении встречными и попутными курсами

Видно, что при движении нашего судна в потоке встречных судов с увеличением скорости V опасность столкновения возрастает. Однако в попутном потоке картина качественно иная: с ростом скорости нашего судна опасность столкновения сначала падает, а потом начинает возрастать, т.е. кривая имеет экстремум. Таким образом, существует наиболее безопасная скорость движения нашего судна в потоке попутных судов. Эта скорость равна медиане распределения скоростей судов потока.

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 наделок [2, 5]. Данная модель также позволяет сделать некоторые предварительные выводы относительно влияния характера движения судов на безопасность мореплавания:

1. Плотность интенсивности пуассоновского поля прочих судов является одним из основных факторов, влияющих на опасность столкновения.

2. При пересечении фарватера с интенсивным судоходством опасность столкновения снижается с увеличением скорости нашего судна, что связано с уменьшением времени нахождения нашего судна на участке акватории, где возможно столкновение.

3. При движении в потоке встречных судов уменьшение скорости нашего судна снижает опасность столкновения.

4. В потоке попутных судов наиболее безопасной скоростью нашего судна является медиана распределения скоростей судов потока.

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. Дмитровский, 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. Дмитровский // 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. Дмитровский // 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. Мاستушкин Ю.М. Гидродинамическое взаимодействие судов при встречах и обгонах / Ю.М. Мастушкин. Л.: Судостроение, 1987. 124 с.
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 stolknoventiy sudov (Development of constructive measures to reduce the impact of ship collisions). Morskoy vestnik, special issue №1(13), pp.36–38.
 6. Mastushkin Yu.M. Gidrodinamicheskoe vzaimodeystvie sudov pri vstrechakh i obgonakh (Hydrodynamic interaction of vessels during meetings and overtaking). Leningrad, 1987, 124 p.
 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 О СЦЕНАРИИ ГИБЕЛИ СУДОВ ВО ВРЕМЯ ШТОРМА
ВСЛЕДСТВИЕ ЗАХВАТА ВОЛНОЙ ИХ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ****Евгений Петрович Бураковский**

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

Аннотация

Гибель судов в условиях штормового моря была и остается весьма распространенным явлением, о чем свидетельствуют данные статистики. При этом возникновение ряда катастроф может быть объяснено реализацией механизма захвата волной носовой оконечности судна на встречном волнении. При этом судно может погибнуть как вследствие разрушения корпуса, так и от потери остойчивости. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности. Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка, позволяющая моделировать гидродинамические нагрузки на палубу судна в носовой оконечности в условиях захвата. Показано, что в условиях захвата волной носовой оконечности судна имеет место резкое уменьшение начальной поперечной метацентрической высоты. Кроме того, наблюдается трансформация диаграммы статической остойчивости, отражающая значительное уменьшение восстанавливающего момента. Данные обстоятельства могут привести к гибели судна из-за потери остойчивости при захвате волной носовой оконечности на встречном волнении, что дополнительно усугубляется возникновением кренящего момента, действующего на судно из-за смещения равнодействующей гидродинамических сил от его диаметральной плоскости. Это вызывает необходимость разработки конструктивных мероприятий, повышающих безопасность мореплавания в штормовых условиях.

Ключевые слова: захват волной носовой оконечности, заливание палубы, встречное волнение, потеря остойчивости, опрокидывание, диаграмма статической остойчивости, крен, дифферент.

**MORE ON THE WRECK OF SHIP SCENARIOS DURING A STORM DUE TO
THE SEIZURE BY THE WAVE OF THEIR FORE END****Evgeny P. Burakovskiy**

Dr.Sci.Tech., professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

Ph. D., associate professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Abstract

As evidenced by the statistics the loss of ships in the stormy sea was and still is a very common phenomenon. At the same time, the emergence of a number of catastrophes can be explained by the implementation of the mechanism of seizure by wave the ship's bow in a counter wave. In this case, the ship may wreck as a result of the hull destruction and from the stability loss. In this paper we

present the results of experimental studies of ship stability in conditions of bow end wave capture. To carry out the research, an experimental simulator was developed which allows simulating the hydrodynamic loads on the ship's deck at seizure by wave the ship's bow. It is shown that under conditions of bow seizure by the wave there is a drastic fall in the initial transverse metacentric height. In addition, there is a transformation of the static stability diagram, reflecting a significant reduction in the restoring moment. These circumstances can lead to the wreck of the vessel due to a loss of stability when the bow is seized by the counter wave, which is further aggravated by the appearance of heeling moment acting on the vessel due to the displacement of the resultant hydrodynamic forces from its midship line. This results into necessity of constructive measures development that improve the safety of navigation in storm conditions.

Key words: seizure by wave the ship's bow, flooding the deck, counter waves, loss of stability, overturning, static stability diagram, roll, trim

Введение

Гибель судов в штормовом море по данным статистики остается достаточно распространенным явлением (рис. 1). Поэтому очень важной задачей является изучение причин, ведущих к указанным катастрофам.

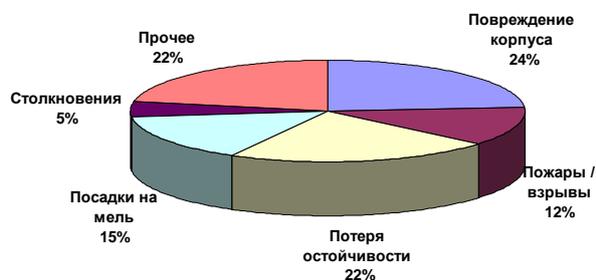


Рис. 1. Причины гибели судов мирового флота

В ряде работ авторов уже поднимался этот вопрос [1-5], где рассматривался механизм гибели судов на примере танкера «Находка», связанный с захватом волной носовой оконечности судна. Следует заметить, что этим механизмом можно объяснить кораблекрушения, связанные не только с разрушением корпусов судов, но и с их опрокидыванием, которое в настоящее время объясняется, в основном, человеческим фактором.

1. Методы исследования

В настоящей работе экспериментальным путем объясняются причины опрокидывания судов при захвате их носовой оконечности волной. При качке судов во время шторма, когда судно развернуто носом на волну, возможно погружение носовой оконечности в воду с последующим ударом волной по палубе в носовой оконечности и обтеканием палубы в двух плоскостях [1-5]. В зависимости от характера волнения, типа судна и условий его загрузки площадь палубы, омываемая водой, может быть различной, при этом на палубе в носу генерируется гидродинамическая сила, величина которой зависит как от характеристик волнения, так и от качки судна на волнении (рис. 2). На рисунке приняты следующие обозначения: V_C – скорость движения судна; V_{WH} – горизонтальная скорость движения волны; V_H – скорость

обтекания палубы в горизонтальном направлении; V_{WV} – вертикальная скорость частиц воды; V_{OV} – вертикальная скорость носовой оконечности, обусловленная качкой судна; V_V – скорость обтекания палубы в вертикальном направлении; V_R – результирующая скорость обтекания палубы; Ψ – угол дифферента судна; β – угол наклона результирующей скорости обтекания палубы по отношению к вертикали; P_R – гидродинамическая сила; P_N – нормальная к палубе составляющая гидродинамической силы; P_T – касательная к палубе составляющая гидродинамической силы. При этом гидродинамическая сила будет приложена в центре тяжести омываемой площади палубы. Хотя данная задача относится к числу динамических, учет влияния гидродинамических сил на остойчивость судна можно свести к рассмотрению судна, нагруженного в носовой оконечности статически приложенной силой. Это позволяет моделировать гидродинамическую силу, приложенную к палубе, при различных площадях омываемой палубы.

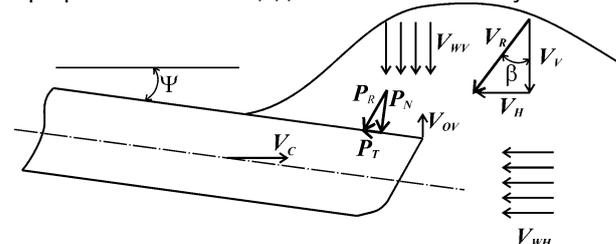


Рис. 2. Схема обтекания носовой оконечности корпуса судна

В действительности нагрузка по палубе распределена неравномерно, кроме того, ее интенсивность непрерывно изменяется, но для простоты анализа ситуации будем полагать нагрузку равномерно распределенной и постоянной на каждом этапе нагружения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности, однако исследовать данное явление можно также расчетным путем с использованием методов теории корабля и соответствующих пакетов программ [3, 5, 6].

Для проведения исследований был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий прикладывать нагрузку к палубе в носовой оконечности модели и определять ее остойчивость. Испытания проводились для различных водоизмещений модели, соответствующих порожнему судну и судну в полном грузу. Схема размещения балласта для полностью загруженного судна представлена на рис. 3.

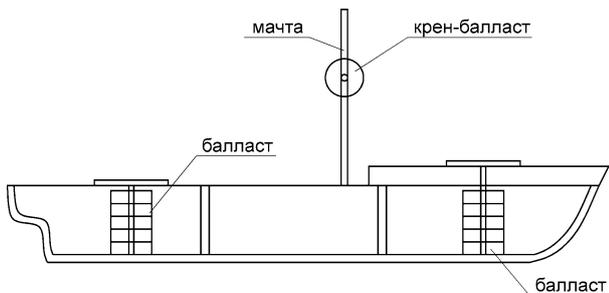


Рис. 3. Схема размещения балласта при испытании модели в полном грузу

2. Методика проведения испытаний

Для определения метацентрической высоты судна в процессе захвата волной носовой оконечности на стенде создавался дифферент модели судна на нос. После установки модели судна с некоторым углом дифферента $\psi = k^\circ$ при помощи системы нагружения производилось определение соответствующей метацентрической высоты h_k , соответствующей данному дифференту.

Посадка судна контролировалась по линейкам, установленным с правого и левого борта в носу, корме и на миделе. Для создания кренящего момента крен-балласт левого или правого борта перемещался по поперечной штанге мачты с поперечной штангой в сторону соответствующего борта на расстояние l_i . При этом снимались показания с линеек правого и левого бортов $z_{нб}$ и $z_{лб}$ а также величина l_i . Далее крен-балласт возвращался в первоначальное положение к диаметральной плоскости модели судна, а после стабилизации положения модели судна осуществлялось перемещение крен-балласта противоположного борта на величину l_i и запись отсчетов на линейках правого и левого бортов $z_{нб}$ и $z_{лб}$. Указанные выше действия повторялись несколько раз для уменьшения величины случайных погрешностей.

По результатам замеров определялась абсолютная величина угла крена модели судна 1 при переносе крен-балласта с использованием зависимости

$$\theta_i = \frac{|z_{нбi} - z_{лбi}|}{a}, \quad (1)$$

где $z_{нбi}$, $z_{лбi}$ – показания, снятые с линеек правого и левого борта при i -ом переносе груза; a – расстояние между линейками правого и левого борта.

Значение начальной метацентрической высоты h_{ki} для модели судна, сидящей с некоторым углом дифферента $\psi = k^\circ$, при каждом переносе крен-балласта определялось по формуле

$$h_{ki} = \frac{m \cdot l_i}{M \cdot \theta_i}, \quad (2)$$

где m – масса переносимого крен-балласта; M – водоизмещение модели судна; l_i – плечо переноса крен-балласта [9].

После проведения серии опытов полученное значение метацентрической высоты модели судна, имеющей угол дифферента $\psi = k^\circ$, усреднялось

$$h_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n h_{ki}, \quad (3)$$

где n – число опытов.

Разработанный стенд для испытания моделей корпусов судов также позволил получить диаграммы статической остойчивости для модели судна в условиях захвата волной носовой оконечности. Так же, как и при определении поперечной метацентрической высоты, нагрузка, имитирующая гидродинамическое воздействие при захвате носовой оконечности судна волной, прикладывалась к палубе судна за счет рамки и системы нагружения. Путем изменения величины кренящего момента за счет перемещения крен-балласта по поперечине находились значения восстанавливающего момента на всем восходящем участке диаграммы статической остойчивости до угла θ_{max} из условия равенства абсолютных величин кренящего и восстанавливающего моментов. При больших углах крена судна линейки выходили из воды, поэтому для замеров углов крена использовался отвес, установленный на мачте судна.

Для определения величины восстанавливающих моментов на нисходящем участке диаграммы использовалась следующая методика. Модель устанавливалась в положение устойчивого равновесия при угле крена θ_1 , соответствующем восходящей ветви диаграммы, в результате действия кренящего момента

$$M_{кр} = m \cdot g \cdot l_y \cdot \cos(\theta_1), \quad (4)$$

который равен по абсолютному значению восстанавливающему моменту.

Затем к мачте модели за счет двух динамометров прикладывалась пара сил, вызывавшая дальнейшее увеличение крена модели. При некотором значении угла крена θ'_1

показания динамометров обнулялись, т.е. модель оказывалась в состоянии неустойчивого равновесия, что соответствует точке на нисходящей ветви диаграммы статической остойчивости и восстанавливающему моменту

$$M_B = m \cdot g \cdot l_y \cdot \cos(\theta'_1). \quad (5)$$

3. Результаты испытаний

На рис. 4 представлена модель БМРТ «Пулковский меридиан» в процессе испытаний на разработанном стенде, результаты экспериментальной оценки начальной остойчивости модели в условиях захвата волной носовой оконечности приведены на рис. 5.



Рис. 4. Модель судна в процессе испытаний

Графическая зависимость на рис. 5 показывает, что при увеличении дифферента судна на нос при захвате волной носовой оконечности метацентрическая высота резко снижается, и при угле дифферента $\psi = 1^\circ$ становится отрицательной. Этот факт подтверждает выводы о резком снижении остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности, полученные расчетным путем [3, 5].

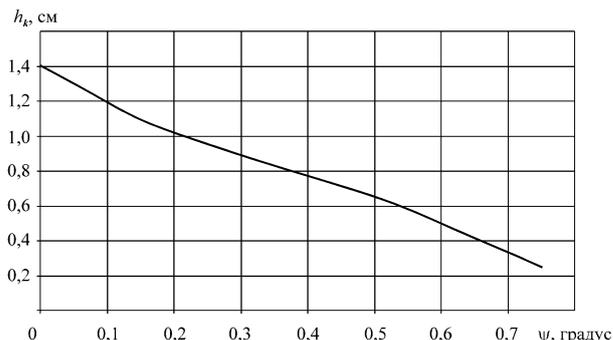


Рис. 5. Изменение начальной поперечной метацентрической высоты модели в зависимости от угла дифферента при захвате волной носовой оконечности

Также было проведено исследование остойчивости модели судна при больших углах крена (рис. 6 и 7).



Рис. 6. Вид со стороны носовой оконечности на модель судна в процессе испытаний

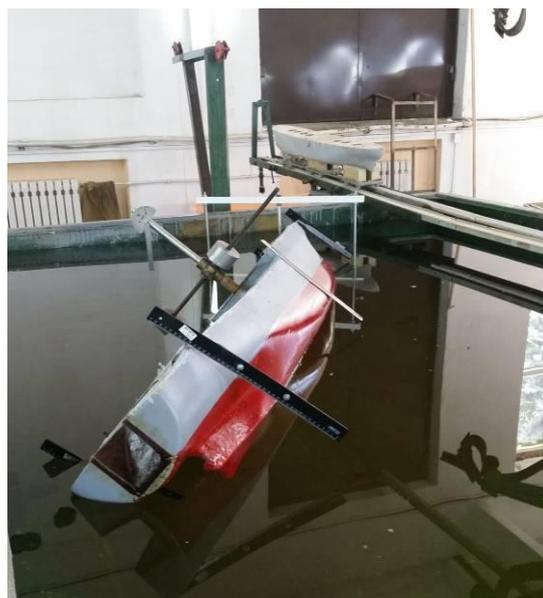


Рис. 7. Вид со стороны кормовой оконечности на модель судна в процессе испытаний

На рис. 8 и 9 представлены диаграммы статической остойчивости для модели БМРТ «Пулковский меридиан» в условиях захвата волной носовой оконечности для различных условий загрузки судна. Видно, что с увеличением нагрузки, действующей на палубу судна в условиях захвата носовой оконечности волной, диаграмма статической остойчивости трансформируется, отражая резкое снижение характеристик остойчивости судна. При этом начальная метацентрическая высота становится отрицательной, и равновесное положение судна будет уже не прямым, а с некоторым углом крена, к тому же максимальные значения восстанавливающего момента резко уменьшаются. Учитывая, что в реальных условиях эксплуатации нагрузка на палубу в носовой оконечности не будет приложена строго в диаметральной плоскости судна вследствие несимметричности обтекания, это приведет к возникновению кренящего момента, который может привести к опрокидыванию судна.

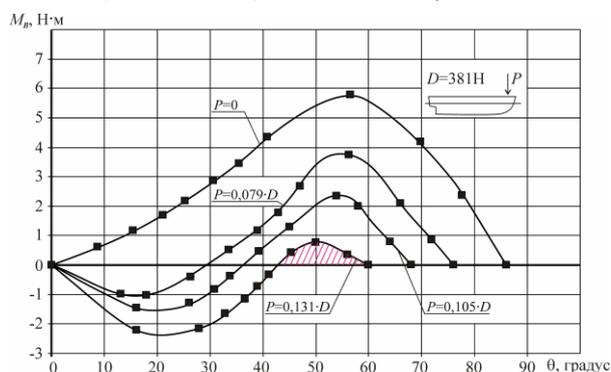


Рис. 8. Трансформация диаграммы статической остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности (судно порожнем)

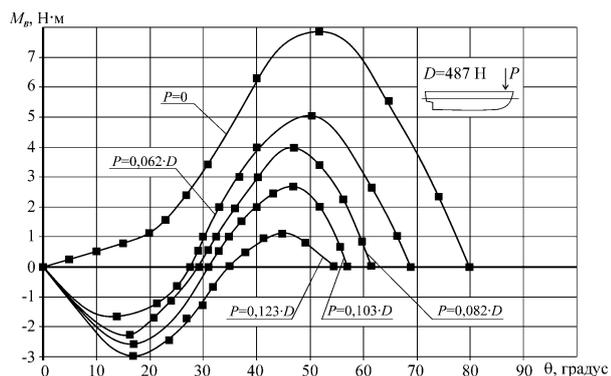


Рис. 9. Трансформация диаграммы статической остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности (судно в грузу)

4. Анализ результатов

Анализ полученных экспериментальных кривых показывает, что в условиях захвата волной носовой оконечности судна наблюдается резкое снижение его остойчивости. Так, из рис. 5 видно, что при угле дифферента $\psi \approx 0,8^\circ$

метацентрическая высота модели уменьшается в 7 раз: с 1,4 см до 0,2 см. При дальнейшем увеличении дифферента модели судна ее начальная поперечная метацентрическая высота становится отрицательной, и модель получает крен на один из бортов даже при отсутствии действия на нее кренящих моментов.

Представленные на рис. 8 и 9 кривые свидетельствуют о том, что в условиях захвата волной носовой оконечности происходит трансформация диаграммы статической остойчивости. Видно, что для порожнего судна (рис. 8) уже при $P = 0,079 \cdot D$ начальная остойчивость становится отрицательной, в результате чего даже при отсутствии внешних воздействий на судно оно будет иметь крен около 30° . Если же учесть, что гидродинамическая сила при захвате волной носовой оконечности приложена не строго в диаметральной плоскости судна, то помимо дифферента эта же сила будет приводить и к увеличению угла крена вследствие возникновения дополнительного кренящего момента. Таким образом, опрокидывание может произойти уже при сравнительно малых давлениях на палубу, когда величина результирующей гидродинамической силы составляет всего $\approx 0,13 \cdot D$, что примерно соответствует величине малого груза.

Для судна в полном грузу наблюдается аналогичная трансформация диаграммы статической остойчивости. Как видно из рис. 9, при $P = 0,062 \cdot D$ начальная поперечная метацентрическая высота является отрицательной, а при $P = 0,123 \cdot D$ максимальное значение восстанавливающего момента составляет примерно одну восьмую часть от того, которое наблюдается при отсутствии гидродинамических воздействий на палубу судна в носовой оконечности, возникающих при захвате волной.

Следует заметить, что представленные результаты получены для судна на тихой воде. При этом на волнении будет наблюдаться трансформация диаграммы статической остойчивости за счет изменения площади ватерлинии [8, 10].

В этом случае при нахождении судна на гребне волны может наблюдаться резкое снижение его остойчивости даже при отсутствии гидродинамических воздействий на носовую оконечность. Это создает дополнительную опасность опрокидывания, так как в случае действия гидродинамических усилий на носовую оконечность будет наблюдаться дальнейшее снижение остойчивости судна с одновременным ростом кренящего момента, вызванного отклонением результирующей гидродинамической силы от диаметральной плоскости судна.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о необходимости разработки конструктивных мероприятий по повышению безопасности мореплавания в условиях штормового моря [7]. Эти мероприятия должны быть направлены как на уменьшение зарывания судна носом в волну на встречном волнении, так и на ограничение гидродинамических усилий, действующих на палубу судна при ее обтекании.

Благодарности. Авторы благодарят Научно-исследовательский центр судостроения ФГБОУ ВО «КГТУ» за предоставление экспериментальной базы для проведения испытаний, а также Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКР АААА-А17-117041810026-1).

Литература

1. Бураковский, Е.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морской вестник. 2013. №1(45). С.89–95.
2. Бураковский, Е.П. Управление и принятие решений при контроле эксплуатационной прочности судна на основе современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии. 2013. №1(19). С.7–14.
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. Сценарии гибели нефте-рудовоза MV «Derbyshire» / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т. 1. С.17–22.
5. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. СПб.: Лань, 2017. 404 с.
6. Бураковский, П.Е. Моделирование чрезвычайной ситуации, связанной с «захватом» волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программам и системам (ВМСППС'2013). М.: Изд-во МАИ, 2013. – С.298–300.
7. Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных решений, направленных на предотвращение захвата волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Вестник АГТУ. Серия: морская техника и технология. 2017. № 2. С. 7–14.
8. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов: учебник / В.Д. Кулагин. Л.: Судостроение, 1986. 392 с.
9. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. В 3 т. Т. 3. Часть V. / Российский Морской Регистр судоходства. СПб.: РМРС, 2015. 361 с.
10. Чижиумов, С. Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. Комсомольск-на-Амуре : ГОУ ВПО «КНАГТУ», 2010. 110 с.

References

1. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. (2013). Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof (Problems of monitoring ship dynamics in extreme situations on the basis of modern catastrophe theory methods). *Morskoy vestnik*, №1(45), pp. 89–95.
2. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnich V.P. (2013). Upravlenie i prinyatie resheniy pri kontrole ekspluatatsionnoy prochnosti sudna na osnove sovremennoy teorii katastrof (Management and decision-making in controlling the ship's operational strength based on modern catastrophe theory). *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, №1(19), pp.7–14.
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. (2017). Stsenarii gibeli nefte-rudovoza MV «Derbyshire» (Scenarios of the lost of the oil-ore carrier MV «Derbyshire»). *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, №3(37), vol. 1, pp.17–22.
5. 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.
6. Burakovskiy P.E. Modelirovanie chrezvychaynoy situatsii, svyazannoy s «zakhvatom» volnoy nosovoy okonechnosti sudna (Simulation of emergency situations associated with the "seizure" by the wave the bow of the ship). *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy mekhanike i sovremenym prikladnym programmam i sistemam (VMSPPS'2013)*. Moscow, MAI, 2013, pp. 298–300.
7. Burakovskiy P.E. (2017). Razrabotka konstruktivnykh resheniy, napravlennykh na predotvrashhenie zahvata volnoj 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. Kulagin V.D. Teoriya i ustrojstvo promyslovykh sudov (Theory and organization of fishing vessels). Leningrad, Sudostroenie, 1986. 392 p.

9. Pravila tehničeskogo nabljudenija za postrojkoj sudov i izgotovleniem materialov i izdelij dlja sudov (Rules for technical supervision of the construction of ships and the manufacture of materials and products for ships). Vol. 3. Part V. Saint Petersburg, Russian register of shipping, 2015. 361 p.

10. Chizhiumov S. D. Osnovy dinamiki sudov na volnenii (The fundamentals of ship dynamics on the waves). Komsomol'sk-na-Amure, Komsomol'sk-na-Amure state technical university, 2010. 110

УДК 624.012

КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАРУЖНОЙ ОБШИВКИ КОРПУСОВ СУДОВ

Алексей Игоревич Притыкин

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

Аннотация

Несмотря на высокую эффективность лакокрасочных покрытий, эксплуатация корпусов судов неизбежно связана с коррозионным износом их наружной обшивки. При назначении расчетных толщин при оценке общей продольной прочности в величине критических толщин учитываются надбавки на коррозионный износ в явном виде. Такие надбавки подразумевают равномерный износ пластин. В действительности коррозионный износ носит неравномерный язвенный характер, приводящий к возникновению мелких очагов концентрации напряжений, которые в отдельных случаях при наличии вибрационной нагрузки могут привести к появлению трещин в обшивке. В работе рассмотрены закономерности язвенного коррозионного износа и путем статистической обработки получены такие характеристики поля корродированной поверхности как корреляционная функция и спектральная плотность. Располагая ими можно оценить напряженное состояние и концентрацию напряжений в корродированной пластине. Специально разработанная программа на языке ANSYS позволяет задавать корродированную пластину со случайной поверхностью, описываемой распределением Гаусса с заданной величиной дисперсии. Расчет напряженного состояния такой пластины МКЭ позволил оценить уровень концентрации напряжений в ней, равный примерно 1.2-1.9 при осевом растяжении, характерном для случая общего изгиба корпуса судна. Анализ результатов расчета показал, что полученная зависимость позволяет по параметрам коррозии приближенно определять величину коэффициента концентрации напряжений. Полученные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с численными расчетами МКЭ.

Ключевые слова: коррозия, наружная обшивка, корреляционная функция, концентрация напряжений, эмпирическая зависимость, МКЭ.

CORROSION WEAR AND TEAR AND ITS INFLUENCE ON STRESS STATE OF SHELL PLATING OF THE SHIP HULLS

Alexej I. Pritykin

Dr.Sci.Tech., associate professor, professor of department of shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
Immanuel Kant Baltic Federal University
ul. A.Nevskogo 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: prit_alex@mail.ru

Abstract

In spite of high efficiency of the paint coatings an exploitation of ships is inevitably connected with corrosion wear and tear of shell plating of the ship's hull. Under appointment of calculated thicknesses for critical different types shows that damage of bottom floors with openings in web take place. One of under estimation of longitudinal strength of ship hull it is taking into consideration adding for corrosion in implicit form. Such adding takes in a view uniform wear of plates. But in reality corrosion have the stochastic ulcer character of wear, leading to appearing of small nidus of stress concentration which in definite cases under existence of vibration loads can bring to appearance of cracks in plates of hull. In work regularities of the ulcer corrosion wear and tear and with the statistical envelopment it was obtained such characteristics of the field of corroded surface as correlation function and spectral density. Knowing them it is possible to evaluate stress state and stress concentration in corroded plates. Specially elaborated program in ANSYS language allow describing of corroded plate with stochastic surface, described as Gauss distribution with determined beforehand variation. Calculation of the stress state of such plate by FEM allow evaluate of level of stress concentration in it equal approximately to 1.2-1.9 under axial tension, which is typical for case of common bending of the ship's hull. Analysis of results of calculation show that obtained relation allow on parameters of corrosion to determine approximately magnitude of the stress concentration factor. Obtained results are in good correlation with numerical computation by FEM.

Key words: corrosion, shell plating, correlation function, stress concentration, empirical relation, FEM.

Введение

Коррозионный износ наружной обшивки часто является одной из причин ремонта корпуса судна [1]. Несмотря на обширное количество антикоррозионных красок, корпус судна вследствие истирания при швартовках и агрессивности морской воды подвергается язвенной коррозии [2,3]. Наличие коррозии приводит как к изменению средней толщины пластин корпуса, так и к появлению локальных концентраторов напряжений [4]. Учитывая, что корпус судна испытывает на волнении переменные по величине нагрузки и вибрацию, наличие питтингов в некоторых случаях становится причиной появления трещин в обшивке. Для оценки напряженного состояния корродированной пластины надо знать закономерности ее износа, уметь описать поле корродированной поверхности как случайный двухмерный процесс. Цель работы состоит в получении зависимости для оценки величин коэффициентов концентрации корродированных пластин в зависимости от параметров коррозионного износа как случайной функции [5].

1. Характеристики корродированной поверхности

Необходимость определения статистических характеристик корродированных пластин появляется в связи с расчетами на прочность наружной обшивки корпусов судов. Получение профиля корродированной поверхности можно производить двумя способами: с помощью профилографа [6] или фотооптическим методом. Первый способ обеспечивает получение ординат профиля поверхности износа непосредственно на корпусе судна, так как позволяет устанавливать профилограф с помощью магнитных присосок прямо на обшивке. Второй удобен в лабораторных условиях на зашлифованных образцах обшивки, обеспечивая более высокую точность замеров (рис. 1).



Рис. 1. Вид профиля с язвенной коррозией на фотобумаге после масштабирования

Исследование закона распределения ординат профиля корродированной поверхности, проведенное в работе [5], позволяет утверждать, что кривая плотности вероятности близка к нормальному закону распределения.

Вероятностные характеристики определялись как для отдельного сечения, так и для поля пластины в целом. У пластин с развитой коррозией коррозионные язвыны перекрывают

одна другую. Именно такая коррозия вызывает опасения за возникновение трещин при эксплуатации судна.

В общем случае поле корродированной поверхности может быть представлено в форме интеграла Фурье

$$H(x, y) = 2t + \int_{-\infty}^{+\infty} \int V(\mu, \nu) e^{i(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu, \quad (1)$$

где $2t$ - средняя толщина пластины; $V(\mu, \nu)$ - случайная функция.

Исчерпывающей характеристикой нормального случайного процесса с нулевым математическим ожиданием является его корреляционная функция $K_H(\xi, \eta)$, которую можно аппроксимировать зависимостью

$$K_H(\xi, \eta) = D_H e^{-\beta^2(\xi^2 + \eta^2)} \cos \alpha \xi \cos \alpha \eta, \quad (2)$$

где D_H - дисперсия поля (1).

Вследствие однородности случайного поля $H(x, y)$ корреляционная функция не зависит от выбранного направления разрезов. Зная корреляционную функцию (2), можно с помощью косинус-преобразования Фурье определить спектральную плотность $S_H(\mu, \nu)$ в виде

$$S_H(\mu, \nu) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int K_H(\xi, \eta) e^{-i(\mu\xi + \nu\eta)} d\xi d\eta. \quad (3)$$

Знание спектральной плотности во многих случаях упрощает практические расчеты.

2. Решение задачи теории упругости

Неравномерный износ вследствие язвенной коррозии ведет к появлению в обшивке корпуса большого числа локальных концентраторов напряжений. Для оценки величины коэффициента концентрации напряжений α_σ в пластине с корродированной поверхностью, описываемой случайной функцией требуется решение объемной задачи теории упругости.

Напряженное состояние упругого полупространства с шероховатой поверхностью, описываемой стационарной случайной функцией, рассматривалось в работе В.А. Пальмова [7].

В данной работе решалась задача о напряженном состоянии бесконечной пластины с одной корродированной поверхностью и средней толщиной равной $2t$, подверженной на бесконечности действию растягивающих напряжений σ в направлении оси OX. Суть подхода заключалась в трансформации граничных условий на поверхности $z = H(x, y)$ с помощью разложения Тэйлора в граничные условия на плоскости $z = t$. Решение задачи выполнялось операционным методом. Согласно подходу А.И. Лурье [8] функция напряжений χ определялась из дифференциального уравнения

$$\sin t \nabla \left(1 + \frac{\sin 2t \nabla}{2t \nabla}\right) \nabla^3 \chi = \frac{\sigma \partial_1 H}{2G}, \quad (4)$$

где $\nabla^2 = \partial_1^2 + \partial_2^2$ - оператор Лапласа; $\partial_1 = \partial / \partial x$.

Поскольку корродированная поверхность допускает разложение (1) в форме интеграла Фурье, то выражение для функции напряжений принимает вид

$$\sigma_x = \sigma - \frac{\sigma}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \left\{ \frac{\mu^2 v^2 [2 + (1 + \omega) \frac{sh 2\gamma t}{\gamma}] + \mu^4 \frac{sh 2\gamma t}{\gamma}}{\gamma^3 th \gamma t (1 + \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma})} + \frac{\mu^2 v^2 [2 - (1 + \omega) \frac{sh 2\gamma t}{\gamma}] - \mu^4 \frac{sh 2\gamma t}{\gamma}}{\gamma^3 ch \gamma t (1 - \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma})} \right\} V(\mu, \nu) e^{i(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu. \quad (6)$$

Так как $V(\mu, \nu)$ -стохастическая функция с нулевым математическим ожиданием, то напряжения σ_x (6) также представляют собой случайную функцию. Характеристиками σ_x являются ее корреляционная функция, математическое ожидание, которое в данном случае будет равно $M(\sigma_x) = \sigma$ и дисперсия

$$D(\sigma_x) = \sigma^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int \left\{ \frac{\mu^2 v^2 [1 + (1 + \omega) \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma}] + \mu^4 \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma}}{\gamma^3 th \gamma t (1 + \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma})} + \frac{\mu^2 v^2 [1 - (1 + \omega) \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma}] - \mu^4 \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma}}{\gamma^3 ch \gamma t (1 - \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma})} \right\}^2 S_H(\mu, \nu) d\mu d\nu \quad (8)$$

Таким образом, знание корреляционной функции (2), получаемой путем обработки профилограмм корродированной поверхности и аппроксимации соответствующей кривой, позволяет вычислить спектральную плотность $S_H(\mu, \nu)$, определяемую в виде (3), а затем и дисперсию напряжений (8). Вычисление дисперсии (8) в общем случае коррозионного износа представляет собой довольно трудную задачу, которая после перехода к полярным координатам и однократного интегрирования по φ позволяет получить дисперсию в виде интеграла функций Бесселя мнимого аргумента. Поэтому здесь проведем численные расчеты, рассмотрев корродированную поверхность в упрощенном виде в форме регулярной поверхности.

3. Определение величины ККН в обшивке с регулярной поверхностью

Одним из удобных методов анализа корродированных пластин является гармоническое разложение ее поверхности с помощью рядов Фурье. Гармонический анализ позволяет получить спектр профиля и определить наличие в нем преобладающих гармоник. Реальный профиль корродированной поверхности не может быть представлен конечным числом гармоник, так как в нем имеются стохастические компоненты. Как известно, корреляционная функция позволяет найти скрытый периодический профиль.

$$\chi = \frac{\sigma}{4G} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \frac{i\mu V(\mu, \nu)}{\gamma^3 sh \gamma t (1 + \frac{sh 2\gamma t}{2\gamma})} e^{i(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu, \quad (5)$$

где $\gamma = \sqrt{\mu^2 + \nu^2}$.

Опуская достаточно сложные промежуточные выкладки, приведем выражение для нормальных напряжений, возникающих в обшивке вблизи корродированной поверхности

$D(\sigma_x)$. Учитывая нормальный характер распределения напряжений, коэффициент концентрации напряжений может быть подсчитан с 3%-ной обеспеченностью по соотношению

$$\alpha_\sigma = 1 + 2.96 \sqrt{D(\sigma_x) / M(\sigma_x)}. \quad (7)$$

Дисперсия напряжений $D(\sigma_x)$ может быть представлена зависимостью

В простейшем случае можно описать износ обшивки в форме синусоидальной поверхности

$$H(x, y) = a \sin \gamma x \sin \gamma y, \quad (9)$$

где γ - частота гармоник.

В случае $H(x, y)$ вида (9) спектральная плотность $S_H(\mu, \nu)$ представляет собой произведение дельта-функции Дирака на дисперсию D_H ординат профиля поверхности $H(x, y)$. Тогда имеем

$$S(\mu, \nu) = D_H \delta(\mu - \gamma) \delta(\nu - \gamma). \quad (10)$$

Преобразуя выражение для дисперсии напряжений (8) с учетом функции (10), после двойного интегрирования и подстановки (8) в (7) приходим к выражению для коэффициента концентрации напряжений в форме

$$\alpha_\sigma = 1 + 0.95 \gamma a \left(\frac{1 + (2 + \omega)\theta}{(1 + \theta)th \gamma t} + \frac{1 - (2 + \omega)\theta}{(1 - \theta)ch \gamma t} \right), \quad (11)$$

где ω - коэффициент Пуассона; $\theta = sh 2\gamma t / 2\gamma$.

Располагая выражением (11) для α_σ пластины с регулярной поверхностью, произведем расчеты методом конечных элементов и сопоставим результаты.

4. Расчет величины α_σ методом конечных элементов

Произведем численный расчет величины α_σ для пластины с корродированной поверхностью в форме синусоиды с различными параметрами частот γ , толщин $2t$ и разными амплитудами a . Расчет выполнен с помощью программного комплекса ANSYS с применением элементов типа SHELL 63. Пластина подвержена осевому растяжению в направлении оси OX при среднем уровне напряжений равном единице. Размеры конечных элементов $\Delta_{КЭ} = 1$ мм.

Для пластины с параметрами: $\gamma = \pi/10$ мм⁻¹; $t = 7$ мм и амплитудами от $a = 0.7$ мм; 1 мм и 1.5 мм картина распределения напряжений представлена на рис.2.

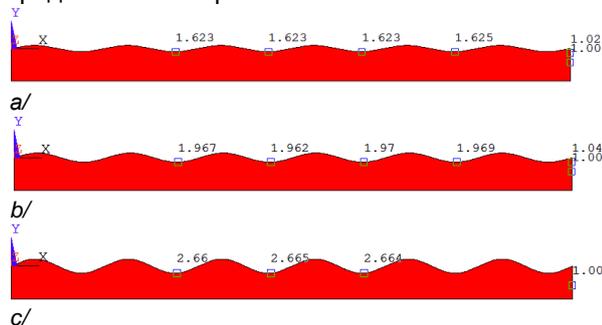


Рис.1. Рис.2. Концентрация напряжений в зависимости от глубины коррозии: а) $a = 0.7$ мм; б) $a = 1.0$ мм; в) $a = 1.5$ мм

Расчет величины α_σ по зависимости (11) при $\omega = 0.3, \gamma = \pi/10$ мм⁻¹; $2t = 14$ мм; $a = 0.7$ мм, произведенный с помощью табличного процессора Excel, дает значение $\alpha_\sigma = 1.64$. Расхождение с величиной $\alpha_\sigma = 1.62$, полученной МКЭ (рис.2,а), составляет 1.2%. При той же толщине пластины $2t = 14$ мм, но с величиной $a = 0.7$ мм, расчет по (11) дает $\alpha_\sigma = 1.91$, что приводит к погрешности вычислений по сравнению с МКЭ $\alpha_\sigma = 1.97$ (рис.2,б) порядка 3%.

При толщине пластины до $2t = 20$ мм при параметрах профиля $\gamma = \pi/20$ мм⁻¹ и $a = 2$ мм концентрация напряжений в зоне язвин по МКЭ составляет величину $\alpha_\sigma = 1.81$ (рис.3). При тех же параметрах коррозии с увеличением толщины пластины вдвое концентрация напряжений снижается на 8%.

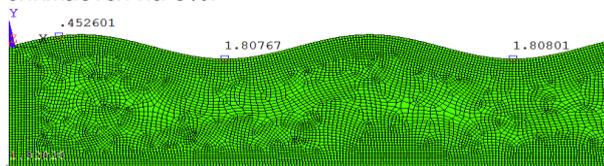


Рис.3. Распределение напряжений в окрестности

поверхности с $\gamma = \pi/20$ мм⁻¹; $2t = 20$ мм; $a = 2$ мм

Отметим, что синусоидальная поверхность представляется несколько идеализированной, так как в действительности корродированная поверхность имеет вид, показанный на рис.1. Вычисления МКЭ пластины с такой поверхностью (рис.4) свидетельствуют, что и в этом случае зависимость (11) дает похожие результаты: $\alpha_\sigma = 1.9$.

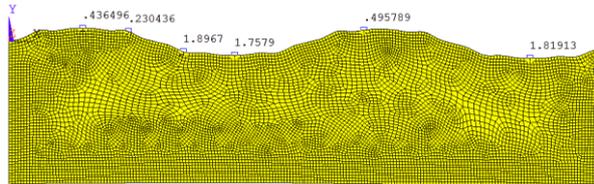


Рис.4. Распределение напряжений в корродированной пластине: $2t=20$ мм, $a=1.9$ мм, $\gamma = \pi/20.9$ мм⁻¹

Наряду с синусоидальной формой износа была рассмотрена задача определения напряженного состояния корродированной пластины со случайным полем. С этой целью использовалась программа МКЭ, позволяющая генерировать корродированную пластину совокупностью конечных элементов разной толщины. с заданными статистическими параметрами износа: средней толщиной пластины $2t$ и дисперсией ординат профиля D_H . При этом толщина каждого КЭ генерируются автоматически по закону нормального распределения, т. е. поверхность пластины представляет собой изрытое язвинами поле (рис.5) с заданной дисперсией ординат профиля.

Задав дисперсию ординат профиля равной $D_H = 1$ мм² и среднюю толщину $2t = 20$ мм, получим распределение напряжений, представленное на рис.5.

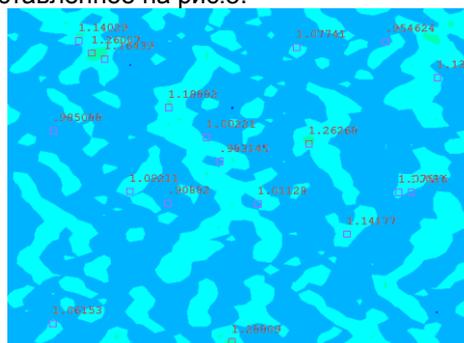


Рис.5. Мозаика напряженного состояния, отражающая изменение толщины по полю пластины

Картина напряженного состояния пластины (рис.5) показывает, что при среднем уровне напряжений в пластине равном $\sigma = 1$ Н/мм², величины наибольших напряжений в зоне язвин достигают значений 1.29 МПа, т. е. при таком износе коэффициент концентрации напряжений равен $\alpha_\sigma = 1.29$. Столь низкий уровень

α_σ свидетельствует об относительно неглубокой коррозии.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет заключить:

– при заданных параметрах корродированной поверхности, описываемой случайной функцией, напряжения в изношенной пластине могут быть определены по формуле (6), а коэффициент концентрации напряжений по зависимости (7);

– задача напряженного состояния корродированной пластины с помощью разложения в ряд Тэйлора может быть преобразована в трехмерную задачу теории упругости для пластины, нагруженной только касательными напряжениями на одной из ее поверхностей;

– уровень концентрации напряжений можно определить, зная такую характеристику поля как спектральная плотность;

– значение α_σ для язвин глубиной 1.4мм- 2мм составляет величину $\alpha_\sigma = 1.62$ и

$\alpha_\sigma = 1.97$ соответственно;

– указанные значения ККН могут быть использованы при оценке усталостной прочности при вибрационных нагрузках, характерных для районов расположения машинного отделения или кормового подзора.

Благодарность

Автор признателен доценту кафедры инженерной механики Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота С.В. Тананыкину за помощь в разработке программ на языке ANSYS.

Литература

1. Kazakova I. A., Surov O. E. Analysis of corrosive wear of hull structures of fishing vessels//The 28th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2014), Istanbul, Turkey, 2014. Pp.130-136.
2. Суров О.Э., Компанец В.А. Исследование характера коррозионного разрушения листов наружной обшивки ледового пояса судов из стали 09Г2С.// Черные металлы. 2015. № 10. –с.39-45.
3. Миронов А.С., Новиков В.В, О коррозионном износе и повреждаемости судовых конструкций // Морские интеллектуальные технологии. 2014. № 25 – с.63-70
4. Ibrahim R.A. Overview of structural life assessment and reliability, part II: fatigue life and reliability assessment of naval ship structures// Journal of Ship Production and Design. 2015. Т. 31. № 1. С. 1-29.
5. Pritykin, I. A. Probabilistic characteristics of the field of corroded surface.//Proceedings of the 19th Int. conf. "Mechanika- 2014".– Kaunas, "Technologija" , 2014, p.203-206.
6. Притыкин И.А., Медведев А.А. Электромеханический шаговый профилограф. Труды КТИРПИХ. вып. XXXV. Kaliningrad. 1971.- с.18-23.
7. Пальмов В.А. Напряженное состояние вблизи шероховатой поверхности упругих тел //Прикладная механика и математика. 1963, т. 5. с.34-41.
8. Лурье А.И. Объемные задачи теории упругости. –Москва, Гостехиздат. 1955. 465с.

References

1. Kazakova I. A., Surov O. E. (2014) Analysis of corrosive wear of hull structures of fishing vessels. *The 28th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures* (TEAM 2014), Istanbul, Turkey. 130-136.
2. Surov O.E., Kompanez V.A. (2015) Investigation of character of corrosive wear of shell plating of the ice belt of hull vessel, fabricated from steel 09g2. *Black metals*. 10. 39-45.
3. Mironov A.S., Novikov V.V, (2014) About corrosive wear and damage of ship structures. *Marine intellectual technologies*. 25. 63-70.
4. Ibrahim R.A. (2015) Overview of structural life assessment and reliability, part II: fatigue life and reliability assessment of naval ship structures. *Journal of Ship Production and Design*. 31(1). 1-29.
5. Pritykin, I. A. (2014) Probabilistic characteristics of the field of corroded surface. *Proceedings of the 19th Int. conf. "Mechanika- 2014"*.– Kaunas, "Technologija" , 203-206.
6. Pritykin I.A., Medvedev A.A. (1971) Electromechanical stepped profilograph. *Proceedings of KTI*. v.XXXV. Kaliningrad. 18-23.
7. Palmov, V.A. (1963) Stress state in vicinity of not smooth surface of elastic bodies. *Journal of Appl. Mech. & Math.*, 5, 34-41.
8. Lurje, A.I. (1955) Volumetric problems of the theory of elasticity. –Moscow, Gostechizdat, 465p.

УДК 629.5.015

ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СУДНА С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ

Евгений Петрович Бураковский

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

Юрий Иванович Нечаев

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

Владимир Прокофьевич Прохнич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: prochnich@mail.ru

Аннотация

Рассматривается проблема самоорганизации эволюционной динамики судна в сложных условиях взаимодействия судна с внешней средой. Основное внимание обращается на формирование процессов структурной, параметрической и функциональной самоорганизации при неопределенности и неполноте исходной информации. При разработке динамической теории катастроф, отображающей процессы самоорганизации, использован математический аппарат нелинейных нестационарных систем, включающий модель функционала действия и модифицированные модели Дуффинга и Матъе. Приведены примеры использования интеллектуальных технологий при исследовании смены состояний, возникновении резких скачкообразных изменений в поведении судна, а также угрожающих ситуаций при интенсивных внешних возмущениях. Динамические картины возникновения пульсирующей «потенциальной ямы» при движении на встречном волнении иллюстрируют интенсивную качку судна и удар волны в носовую оконечность в ситуации «захвата» и возникновения «потенциальной ямы». Рассмотренные подходы могут быть использованы при разработке бортовых интеллектуальных систем для контроля динамики судна в сложной динамической среде, что позволит повысить безопасность судна в условиях неопределенности, в частности, при возникновении опасности захвата волной носовой оконечности судна.

Ключевые слова: динамика судна, самоорганизующаяся система, динамическая теория катастроф, потенциальная яма, текущая ситуация, аварийная ситуация, потеря устойчивости.

GOVERNANCE ISSUES AT THE VESSEL INTERACTION WITH THE EXTERNAL ENVIRONMENT

Evgeny P. Burakovskiy

Dr.Sci.Tech., professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: e_burakovsky@mail.ru

Pavel E. Burakovskiy

Ph. D., associate professor of department of marine safety
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Yury I. Nechaev

Dr.Sci.Tech., professor, professor of department of shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: nechaev@ifmo.mail.ru

Vladimir P. Prokhnich

Ph. D., associate professor, associate professor of department of shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: prokhnich@mail.ru

Abstract

Governance ship's evolutionary dynamics issue in the complex conditions of vessel interaction with the external environment is examined in the article. The main attention is drawn to the structural, parametric and functional governance processes creation in conditions of uncertainty and lack of the initial information. Developing a dynamic theory of catastrophes reflecting the processes of governance, there was used the mathematical apparatus of nonlinear nonstationary systems, including a model of the action functional and modified models of Duffing and Mathieu. Usage examples of intelligent technologies in the study of the change of states are provided, as well as the emergence of sudden spasmodic changes in the behavior of the ship and the threatening situations with intense external disturbances. Dynamic pictures of the pulsating "potential well" occurrence during a movement in a counter wave illustrate the intense rolling of the ship and the impact of the wave in the bow end in a "capture" situation and "potential well" occurrence. The examined approaches can be used to develop on-board intelligent systems to monitor ship dynamics in a complex dynamic environment, which will improve the vessel's safety in the face of uncertainty in particular when there is a risk of wave capture by ship's bow section.

Keywords: ship dynamic, self-organizing system, dynamic catastrophe theory, potential well, the current situation, emergency, loss of stability.

Введение

В настоящей статье обсуждаются концептуальные решения при моделировании поведения судна как самоорганизующейся системы в рамках динамической теории катастроф. Основное внимание уделяется интерпретации системы «судно – внешняя среда» с использованием структурной, параметрической и функциональной самоорганизации на основе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений.

При разработке систем поддержки принятия решений (ППР) используются результаты интерпретации самоорганизующихся систем [5-21]. Анализ альтернатив и выбор решения в системе взаимодействия осуществляется в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [21] на основе принципа конкуренции [10]. Рассматривается подход и вычислительная технология, обеспечивающие контроль поведения системы «судно – внешняя среда» в условиях самоорганизации на основе программного комплекса виртуального полигона (ВП) [14] как открытой развивающейся активной динамической системы (АДС) [15], функционирующей в среде UC (рис.1).



Рис.1. Поток информации при реализации программного комплекса ЭП

Динамическая модель UC реализуется на базе эффективного математического аппарата, построенного на основе принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [10]. Алгоритмы преобразования информации основаны на реализации концепции самоорганизующихся систем [6, 8, 16, 19, 20] и конкурирующих вычислительных технологий, использующих классическую теорию управления, нечеткую логику и искусственные нейронные сети (ИНС) [12-14]. Использование принципов самоорганизации и самоуправления обеспечивает перестройку программного комплекса на основе принципа адаптивного управления. Формализация алгоритмов управления «от исходных данных – к общей модели взаимодействия» связана с выдвижением гипотезы о классе моделей самоорганизации, формированием процедур автоматической генерации вариантов моделей и выбором в этом классе наилучшей модели на основе критериальных оценок. В результате формируется организованная структура самоорганизации, отображающая причинно-следственные связи и закономерности, «скрытые» в исходных данных. Это позволяет рассматривать предлагаемый подход к построению интерпретирующего комплекса ВП в рамках концепции интеллектуального анализа данных и средств вычислительного интеллекта [14] при исследовании эволюционной динамики судна, в том числе и при возникновении «потенциальной ямы» [13].

1. Модели интерпретации эволюционной динамики

При разработке динамической теории катастроф, отображающей процессы самоорганизации, использован математический аппарат нелинейных нестационарных систем [13], включающий модель функционала действия [10] и модифицированные модели Дуффинга и Матье [12], а также интерпретирующие алгоритмы символической динамики, мультиагентного и когнитивного моделирования. Причем формирование периодической составляющей модифицированного уравнения Матье реализовано с использованием нелинейной пространственной функции, интегрирующей возмущающую и восстанавливающую компоненты с учетом интерференционной компоненты, расчет которой практически невозможен вследствие отсутствия модели интерференции корабельных и набегающих волн.

Созданная на базе достижений классической математики и интеллектуальных технологий модель современной теории катастроф (рис.2) определяет структуру системы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде. При изменении управляющих параметров система может эволюционировать к состоянию устойчивого равновесия, соответствующего области стабилизации при движении системы к целевому аттрактору, и к состоянию потери устойчивости и возникновении катастрофы.



Рис. 2. Динамическая модель катастрофы, отображающая область моделирования поведения судна на волнении

Возможны различные интерпретации современной теории катастроф в зависимости от рассматриваемой проблемы взаимодействия в условиях самоорганизации. Исходным является понятие множества, позволяющего определить все основные понятия новой интерпретации математически приемлемым способом. В общем виде динамическая модель катастрофы при исследовании динамики судна в условиях самоорганизации представляется в виде отображения [12]:

$$\text{Cat}(D) = \langle \text{Cat}(B), \text{Cat}(E, DO), \text{Cat}(F, DO) \rangle, \quad (1)$$

где $\text{Cat}(B)$ – бифуркационное множество, $\text{Cat}(E, DO)$ – множество, определяющее взаимодействие судна как динамического объекта (DO) с внешней средой (E); $\text{Cat}(F, DO)$ – множество, определяющее особенности состояния DO .

Исследование процессов самоорганизации сводится к построению моделей эволюционной динамики при смене состояний судна и возникновении резких скачкообразных явлений на интервале реализации, формировании угрожающих ситуаций и возникновении пульсирующей «потенциальной ямы».

2. Адаптивный алгоритм интерпретации динамики самоорганизующейся системы

Одна из особенностей вычислительной технологии ВП – возможность адаптации к изменяющимся условиям взаимодействия судна с внешней средой. Организация адаптивной среды динамической базы знаний предполагает наличие функциональных подпрограмм, обеспечивающих управление и адаптацию (с идентификацией параметров объектов), а также функции селекции оценок параметров на основании процедур ППР, близких к процедурам самообучения для формирования вектора притяжения. Обеспечение ППР в зависимости от результатов измерений с последующим изменением своего поведения на базе адаптивных алгоритмов, самообучение и возможность контроля своей работоспособности за счет автоматической самопроверки выполняемых процедур – стандартные операции, определяемые концепцией разработки программной среды УС на основе динамической теории катастроф [12].

В зависимости от особенностей решаемых задач в рамках ВП используются адаптивные алгоритмы, построенные на базе эталонных моделей или моделей переменной структуры:

- структура алгоритма с эталонной моделью [9, 14]

$$Y_t = \alpha_{t-1}^T B, \hat{Y}_t = \beta_{t-1}^T B_{t-1}, t \in [t_0, T];$$

$$e_t = Y_t - \hat{Y}_t + w_t, \varepsilon_t = \beta_{t-1}^T (B - B_{t-1}). \quad (2)$$

с уточнением и настройкой параметров

$$B_t = B_{t-1} + h\beta_{t-1}e_t, \Delta B_t = \Delta B_{t-1} - h\beta_{t-1}e_t;$$

$$\Delta B = B - B_t, \varepsilon_t = \beta_{t-1}^T \Delta B_{t-1}. \quad (3)$$

и моделью ошибки, связывающей ошибку прогноза e с уравнением ошибки ε .

- структура алгоритма с моделью переменной структуры

$$Y(X) = \sum \beta_k P_k(x), P_k(x) = x^n (n=1,2). \quad (4)$$

Здесь $Y_t, \hat{Y}_t, e_t, \varepsilon_t$ – модель объекта, блок прогноза, ошибка прогноза (априорный прогноз) и уравнение ошибки; $\alpha_{t-1}, \beta_{t-1}$ – векторы информации об объекте и прогнозе; B, B_{t-1} – векторы параметров; w_t – возмущение, отображающее

немоделируемые динамики, шумы или ошибки в измерениях; h – размер шага; $P_k(x)$ – базисные функции; β_k – коэффициенты, подлежащие определению.

Проблема разработки адаптивных алгоритмов особенно актуальна при формировании функции интерпретации на всех стадиях эволюции системы взаимодействия. Адаптивные алгоритмы обеспечивают важнейшее качество функционирования программ-ного комплекса ВП – возможность изменять свое поведение в зависимости от состояния среды взаимодействия, а также способности обучаться на своем опыте [14]. Реализация этого принципа достигается за счет использования высокоинформативных каналов обработки информации при построении и «настройке» математических моделей.

Поведение адаптивной системы в условиях самоорганизации требует обеспечения максимума информации для ее лучшей адаптации в неопределенной среде. В качестве критериального базиса при оценке эффективности функционирования адаптивной системы используется информационный подход [7]. Количественной мерой адаптации в этом случае является взаимная информация между условиями решения задачи и реакцией системы при реализации механизма логического вывода. Эта информация представляется в следующем виде [18]:

$$I(x, y) = \log [p(x/y) / p(x)] = \log [p(x, y) / p(x)p(y)], \quad (5)$$

где $p(x/y)$ – условная вероятность события x при условии наступления события y ; $p(x), p(y)$ – безусловные вероятности событий x и y ; $p(x, y)$ – вероятность комбинации событий или взаимная вероятность.

Приведенное выражение показывает, что между событиями x и y есть связь и мерой этой связи служит взаимная информация $I(x, y)$. Рассматривая события x и y как реализации случайных дискретных переменных X и Y в общем случае являющихся векторами, можно представить взаимную информацию между X и Y как

$$I(X, Y) = \sum_x \sum_y p(x, y) \log [p(x/y) / p(x)] = \sum_y p(y) \sum_x p(x/y) \log [p(x/y) / p(x)] = H(X) - H(X/Y), \quad (6)$$

где $H(X)$ – безусловная энтропия (разнообразие или собственная информация), содержащаяся в X ; $H(X/Y)$ – условная энтропия, отражающая наличие помех в «информационном канале», неоднозначностей в связях X и Y или «разнообразии ошибок», возникающих при передаче информации между X и Y .

Энтропии $H(X)$ и $H(X/Y)$ вычисляются по формулам:

$$H(X) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \log (p(x));$$

$$H(X/Y) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \log (p(x/y)) = - \sum_y p(y) \sum_x p(x/y) \log (p(x/y)). \quad (7)$$

Таким образом, взаимная вероятность представляет собой функционал качества. При большом значении вероятности между условиями и реакциями получаем отрицательную реакцию системы. Принцип отрицательной обратной связи предполагает управление и принятие решений по критерию минимизации нежелательного отклонения или рассогласования между входом и выходом системы. При определенных условиях взаимная вероятность может увеличиваться быстрее, чем вероятности $p(x)$ и $p(y)$ в отдельности.

Суть самоорганизующихся вычислений в программном комплексе ВП состоит в организации самоуправления (self-management), цель которого состоит в построении процедуры контроля функционирования эволюционирующей системы таким образом, чтобы обеспечить возможность работы с пиковой производительностью непрерывно в течение заданного интервала времени. Как и другие аналоги, саморегулируемые компоненты программного комплекса ВП поддерживают и настраивают свою работу с учетом изменений в компонентах, рабочей нагрузки, требований к функциональным элементам и внешним условиям, а также в случае случайных аппаратных и программных сбоев. Саморегулирующаяся система постоянно отслеживает свое поведение и проверяет изменение компонент в процессе контроля динамики развития ситуации.

3. Модели самоорганизации в системах ППР

В программном комплексе ВП реализуются три основных типа самоорганизации: структурная, параметрическая, функциональная [8, 9, 14, 16, 19]. Ниже дается общая характеристика моделей самоорганизации при анализе динамических сцен и формализации знаний в процессе эволюции судна в сложной динамической среде.

В основу структурной самоорганизации принят подход [10, 13], предполагающий замену элементов структурной схемы в процессе функционирования системы взаимодействия. Перестройка структуры интерпретирующей системы в процессе самоорганизации обеспечивается управляющим модулем, позволяющим регулировать исходную ситуацию в зависимости от текущей динамики взаимодействия. Таким образом, дерево решений формируется за счет декомпозиции

подсистем, а модель иерархической структуры представляет собой совокупность моделей подуровней, связанных древовидным отношением:

$$M = \langle M^{sl}, R^T \rangle, \quad (8)$$

где M^{sl} – модель подуровня (sublevel), порожденного подсистемой S; $R^T \in M^{sl}$ – древовидное отношение.

Формирование любого уровня иерархической модели может осуществляться с помощью стандартных оснований декомпозиции, которые хранятся в библиотеках типовых структур и представляются в виде совокупности моделей подсистем, составляющих один подуровень. На любом уровне иерархии выделяют подсистемы и взаимосвязи между ними с соответствующими моделями. Обработка информации при построении дерева решений связана с использованием интегрированных моделей представления знаний, соединяющих возможности схем представления на разных уровнях абстракции. Структурирование поведения объектов самоорганизации в виде дерева решений позволяет построить фрагменты иерархической модели и представить логические решающие функции распознавания, анализа и прогноза исследуемых ситуаций.

В процессе структурной самоорганизации один тип элементов системы заменяется другим типом, причем различные элементы в общей структуре модели не могут заменять друг друга. Стратегия самоорганизации в программном комплексе ВП предусматривает использование встроеной процедуры, обеспечивающей возможность участия элемента структуры в процессе перестройки системы. Корневой элемент системы содержит информацию о минимально допустимом количестве потомков, участвующих в процессе самоорганизации. После выбора типа элемента общей структуры для каждого отдельного элемента задается одна из возможных функций управления. Эта функция является выходной функцией объекта УС и участвует в формировании целевого функционала $\Phi(TF)$ системы. Формально корневой элемент в каждый момент времени в зависимости от особенностей динамической среды конкретного приложения реализует выходную функцию $\Phi(Out)_{j,i} \in \Phi(Out)_i$, где $\Phi(Out)_i$ – набор функций, реализуемых элементом типа i :

$$\Phi(Out)_i = \{\Phi(Out)_{1i}, \Phi(Out)_{2i}, \dots, \Phi(Out)_{mi}\}, \quad (9)$$

где m – число различных функций, которые может реализовать элемент типа i . Каждая функция $\Phi(Out)_{j,i}$, в свою очередь, зависит от набора параметров

$$P(Out)_{j,i} = \{P(Out)_{1i}, P(Out)_{2i}, \dots, P(Out)_{ni}\}, \quad (10)$$

характеризующих элемент типа i .

Применительно к рассмотренной схеме модель структурной самоорганизации искусственных нейронных сетей (ИНС) связана с изменением числа скрытых слоев и числа нейронов в слоях, а также при переходе к другой архитектуре сети в соответствии с концептуальными решениями, определяемыми динамической моделью катастроф [10]. Типичными конфигурациями ИНС являются многослойные сети прямого распространения, нейросетевые ансамбли и интегрированные нейронные сети [10, 12, 13].

Параметрическая самоорганизация УС может быть осуществлена в рамках подхода к нелинейной самоорганизации сложных динамических систем [8]. В основу этого подхода положен принцип адаптивного резонанса, используемый в теории ИНС. В процессе функционирования осуществляется непрерывный контроль текущей ситуации с помощью НФС. Самоорганизация системы основана на подстройке (а в сложных случаях и перестройке) параметров моделей логической системы, управляющей процессом самоорганизации (рис.3). В результате такого преобразования информации устанавливаются такие значения параметров управления, при которых значение целевого функционала $\Phi(TF)$ будет максимальным.

Формируемые на основе подхода [12, 13] свойства динамической базы знаний наиболее четко проявляются в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Важной особенностью нечеткой системы знаний являются:

- возможность сохранения свойства пластичности при запоминании новой информации в процессе функционирования программного комплекса ЭП;
- предотвращение модификации исходной базы знаний за счет формирования новых правил, описывающих возникшую нестандартную конфликтную ситуацию.

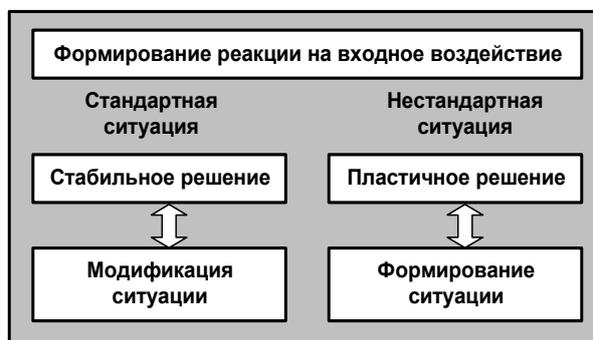


Рис. 3. Адаптивная система, обеспечивающая процесс самоорганизации

Применительно к нейросетевым структурам, параметрическая самоорганизация связана с перестройкой системы синаптических связей ИНС в соответствии с функцией интерпретации, которая модифицируется за счет алгоритма

параметрической настройки сетевой структуры. Формирование управляющих сигналов реализуется в процессе модификации нечетких правил динамической базы знаний и настройки параметров функций принадлежности (ФП) наблюдаемых и управляемых переменных. Настройка системы производится в автоматическом режиме и в режиме обучения, когда управление осуществляет оператор ВП. На основе анализа текущих ситуаций система вырабатывает соответствующие правила поведения. Функционирование системы самоорганизации осуществляется на основе правил вывода НФС. Каждое правило реализует нечеткую модель выбора оптимальной структуры интерпретирующей системы в зависимости от особенностей динамической среды и интенсивности действующих возмущений. Процесс управления организуется на основе принципа конкуренции с использованием методов классической математики, нейро-нечеткого и нейро-эволюционного моделирования [10, 14].

Функциональная самоорганизация реализуется на основе обработки информации, накопленной в процессе практических наблюдений. Значение целевого функционала Ф(УС) управления улучшается с помощью подбора необходимой функции из множества функций для возможных ситуаций-прецедентов среды взаимодействия данного типа. Для каждой функции рассчитывается и сохраняется ее максимально возможное значение и необходимый для этого набор значений параметров. Реализация этой стратегии осуществляется на основе нечеткого логического вывода по прецеденту [13], обеспечивающего вычисление отклонения между откликом исследуемой модели и эталонными откликом. Общая схема такого преобразования с помощью ансамбля матриц нечеткого управления представлена на рис.4.

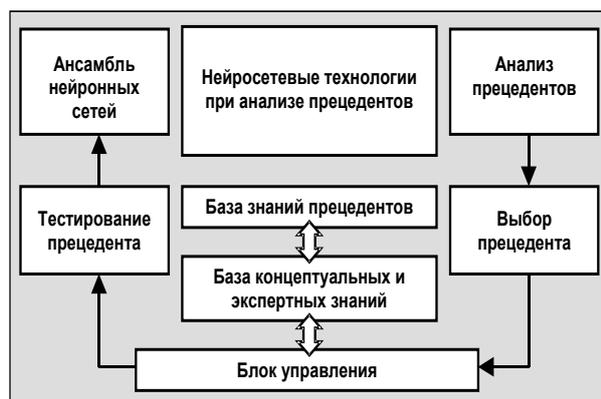


Рис.4. Модель логического вывода по прецеденту

Задачей анализа является выделение локальных областей классов прецедентов. Это достигается путем классификации прецедентов на базе ансамблей моделей нечеткого вывода, включающего различные конфигурации ИНС [10,

13]. Алгоритм классификации реализует минимизацию функционала:

$$G(z_1, \dots, z_M) = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^K \sum_{a \in r_j} \|a - z_j^*\|^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где N_j – число прецедентов в множестве r_j ; K – число областей (классов); z_j^* – среднее значение множества (центр класса).

Поток информации при реализации модели знаний прецедентов обеспечивает самоорганизацию для всех накопленных конфликтных ситуаций. При возникновении ситуации, отсутствующей в базе знаний прецедентов, система управления автоматически использует модель параметрической самоорганизации.

4. Модели самоорганизации при возникновении «потенциальной ямы»

Интерпретация процессов самоорганизации при моделировании нештатных ситуаций рассмотрена в практических приложениях анализа аварийных ситуаций грузового судна «Поронайск» [11] и танкера «Находка» [1-3, 5, 14, 22, 23]. В первом случае возникновение пульсирующей «потенциальной ямы» было связано с явлением «валкости» при периодическом уменьшении метацентрической высоты на попутном волнении, а во втором – с явлением «захвата» носовой оконечности, потерей остойчивости и прочности при движении на встречном волнении [1-5]. Анализ проведен на основе модифицированных уравнений Дуффинга и Матье [12]).

При моделировании явления «валкости» рассматривались различные ситуации взаимодействия: случай нормальной эксплуатации (явление валкости не проявляется); ситуация, когда отдельные значения метацентрической высоты достигают нулевых значений (начало развития валкости); типичная ситуация, когда при воздействии пакета волн появляются отдельные значения метацентрической высоты, которые оказываются отрицательными; предельный случай, соответствующий полному ухудшению начальной остойчивости и возникновению «потенциальной ямы».

Интерпретация аварии танкера «Находка» представляет собой более сложный случай взаимодействия. Динамические картины возникновения пульсирующей «потенциальной ямы» при движении на встречном волнении иллюстрируют интенсивную качку судна и удар волны в носовую оконечность в ситуации «захвата» и возникновения «потенциальной ямы».

Формализация эволюционной динамики судна при интерпретации ситуации «захвата» основана на представлении процесса взаимодействия в условиях слабой, значительной и полной неопределенности. При слабой и значительной неопределенности интерпретация динамической ситуации ведется в рамках представления

внешнего возмущения в виде «климатического спектра» и описания поведения на основе традиционных методов анализа динамических систем. Однако в условиях значительной неопределенности реализуется процесс контроля на основе методов динамической теории катастроф и фрактальной геометрии [12, 13].

Стратегия эксперимента по исследованию пульсирующей «потенциальной ямы» реализована в рамках фрактальной геометрии с учетом особенностей динамической структуры исследуемой катастрофы. В качестве математической модели взаимодействия используется модифицированное уравнение Дуффинга [12], анализ которого выполнен с использованием характеристик судна и данных моделирования [13]. Для повышения эффективности отображения ситуации «захвата» носовой оконечности использовались геометрические образы в виде фрактальной структур. Сценарии развития аварийной ситуации генерировались на основе динамической теории катастроф при различном уровне внешних возмущений. Разработанные структуры соответствует случаям потери прочности и остойчивости при периодическом погружении носовой оконечности танкера. Геометрическая сцена взаимодействия в заданном режиме перестраивается в направлении формирования аттрактора, соответствующего возникновению катастрофы (потеря остойчивости и прочности).

5. Модели самоорганизации в нестандартных режимах взаимодействия

При интерпретации моделей самоорганизации эволюционной динамики судна практический интерес представляют нестандартные режимы взаимодействия судна с внешней средой, в качестве которых рассмотрим особенности контроля смены состояний, скачкообразных явлений и угрожающих ситуаций при функционировании ВР в среде УС.

Рассмотрим модель ППР при контроле поведения судна в условиях самоорганизации на основе динамической модели катастроф. Формирование логического базиса ППР осуществляется на основе обработки текущей информации, поступающей с датчиков измерительной системы. Особенность рассматриваемых состояний эволюционной динамики судна состоит в том, что они являются следствием отклонения определяющего параметра от нормируемого значения. Моделирование состояний включает описание траектории и момента перехода состояний. Смена состояний описывается алгоритмом интерпретации в виде последовательности операций обработки информации в соответствии с принятой формализацией переходов состояний исследуемой динамической системы.

Оценка появления экстремальных значений определяющего параметра в процессе самоорганизации производится на основе плана

Фибоначчи [11] в рамках концепции динамической модели катастроф. Интерпретирующая система учитывает внешнее возмущение, вызванное нерегулярным волнением и нестационарными порывами ветра. Интервал времени, на котором динамические характеристики взаимодействия могут достигать максимального значения, устанавливаются с помощью кода Грея [9], обладающего свойством непрерывности бинарной комбинации. При контроле резких скачкообразных явлений при функционировании судна в сложной динамической среде используется нейронечеткий предиктор. Переходы при возникновении скачкообразных явлений в процессе эволюции представляются в виде цепочки преобразований, определяющей матрицу переходов. Например, цепочка $X \rightarrow Y, Z \rightarrow V$ означает, что судно в ситуации X взаимодействует с внешней средой, имеющей состояние Y , но эта среда уже изменила свое состояние Y на Z и определяется состоянием V . Взаимодействие продолжается, если транзакция $X \rightarrow Y$ не является перекрестной, и прерывается в случае ее реализации.

При интерпретации поведения судна в процессе самоорганизации возникает проблема возникновения угрожающих ситуаций. Такие ситуации определяют неблагоприятное развитие ситуации в виде цепочки «угрожающая \rightarrow предаварийная \rightarrow аварийная» ситуации. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлена топологическая картина эволюционной динамики, соответствующая указанной цепочке, где отображения $\Omega_2, \dots, \Omega_5$ характеризуют переход от угрожающей ситуации Ω_1 к предаварийной Ω_2 и аварийной Ω_3 , а также критической Ω_4 и катастрофической Ω_5 ситуациям при полной потере устойчивости движения [11].

Формальная модель интеллектуального решателя $Int(S)$, обеспечивающего функционирование НФС при прогнозе угрожающих ситуаций, представлена в виде:

$$Int(S) = \{U(Int), A(M), KB\}, \quad [12]$$

где $U(Int)$ – множество допустимых управлений (уровней интеллектуальной поддержки); $A(M)$ – ансамбль методов диагностики состояний и прогноза развития ситуаций; KB – динамическая база знаний.

Стратегия контроля угрожающих состояний особенно актуальна при обработке множества вариантов генерируемых решений. В этом случае логическая структура НФС позволяет выделить правила, отображающие активные события РА (результаты управляющих воздействий) и пассивные события PD (прогноз изменения состояния среды взаимодействия), а также правила PS (уточнение и доопределение состояния среды), характеризующие закономерности предметной области. Решение проблемы параллельного выполнения правил

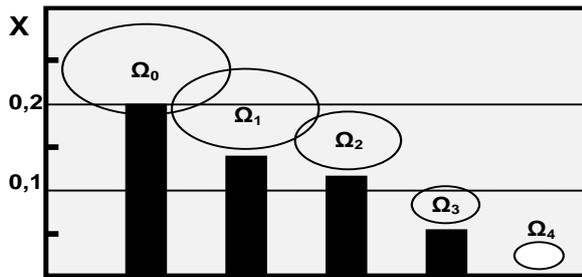


Рис.5. Фрактальное отображение эволюционной динамики судна при различном уровне действующих возмущений: X – определяющий параметр (максимальная ордината диаграммы остойчивости, м; столбики – уровень генерируемых управленческих решений)

НФС достигается путем построения решателя, корректно использующего приведенную классификацию правил модели динамики взаимодействия.

Рассмотренная последовательность работы решателя позволяет прогнозировать динамику текущей ситуации и возможность наступления угрожающего состояния системы взаимодействия

путем обработки правил PS и PD. Для поиска всевозможных состояний ситуации решатель работает по схеме замены множества правил типа PA на множество типа PD. При выборе оптимального плана контроля угрожающих ситуаций в зависимости от промежутка времени между началом прогноза и началом развития угрожающей ситуации из генерируемых планов выбирается оптимальный, время выполнения которого находится ближе к времени эталонного плана на заданную величину упреждения. Величина упреждения для каждого диапазона рассчитывается на основе анализа планов, полученных на ретроспективных данных.

Заключение

Рассмотренные подходы могут быть использованы при разработке бортовых интеллектуальных систем для контроля динамики судна в сложной динамической среде, что позволит повысить безопасность судна в условиях неопределенности, в частности при возникновении опасности захвата волной носовой оконечности судна.

Литература

1. Бураковский, Е.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морской вестник. 2013. №1(45). С.89–95.
2. Бураковский, Е.П. Управление и принятие решений при контроле эксплуатационной прочности судна на основе современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии. 2013. №1(19). С.7–14.
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. Сценарии гибели нефте-рудовоза MV «Derbyshire» / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3(37). Т. 1. С.17–22.
5. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. СПб.: Лань, 2017. 404 с.
6. Кефарт, Д. Концепция саморегулирующихся вычислений / Д. Кефарт, Д. Чесс // Открытые системы. 2003. №2. С.17-26.
7. Колмогоров, А.Н. Теория информации и теория алгоритмов / А.Н. Колмогоров. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Красовский, А.А. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта / А.А. Красовский, А.И. Наумов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. №1. С.69-75.
9. Куприянов, М.С. Алгоритмы структурной самоорганизации распределенных систем / М.С. Куприянов, А.В. Кочетков, Е.А. Нестерова, Ю.Г. Артемьев // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2009. Т.1. СПб., 2009. С.211-213.
10. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века / Под. ред. Ю.И. Нечаева. М.: Радиотехника, 2011. 352 с.
11. Нечаев, Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении / Ю.И. Нечаев. Л.: Судостроение, 1989. 240 с.
12. Нечаев, Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений / Ю.И. Нечаев. СПб.: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
13. Нечаев, Ю.И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения / Ю.И. Нечаев. СПб.: Арт-Экспресс, 2015. 225 с.
14. Нечаев, Ю.И. Нейродинамическая система при функционировании виртуального полигона на основе методов теории катастроф / Ю.И. Нечаев // XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2015». Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2015. С. 220–273.
15. Новиков, Д.А. Курс теории активных систем / Д.А. Новиков, С.Н. Петраков. М.: СИНЕГ, 1999. 104 с.
16. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов / Отв. ред. В.И. Аршинов, В.Г. Буданов, В.Э. Войцехович. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 536 с.

17. Солодовников, В.В. Теория сложности и проектирование систем управления / В.В. Солодовников, В.И. Тумаркин. М.: Наука, 1990. 341 с.
18. Фоминых, И.Б. Интеграция логических и образных методов отражения информации в системах искусственного интеллекта / И.Б. Фоминых // Новости искусственного интеллекта. 1998. №3. С.76-86.
19. Хакен, Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. М.: Мир, 1985. 424 с.
20. Черняк, Л. Адаптируемость и адаптивность / Л. Черняк // Открытые системы. 2004. №9. С.30-35.
21. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
22. Watanabe, Iwao. Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 1. Estimation of wave loads / Iwao Watanabe, Hideomi Ohtsubo// Marine Science and technology. Springer, 1998. Vol.3, No 4. P. 171–180.
23. Yao, Tetsuya. Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 2. Estimation of the structural strength / Tetsuya Yao, Yoichi Sumi, Hiroyasu Takemoto, Atsushi Kumano, Hidetoshi Sueoka, Hideomi Ohtsubo// Marine Science and technology. Springer, 1998. Vol.3, No 4. P.181–193.

References

1. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhlich V.P. (2013). Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof (Problems of monitoring ship dynamics in extreme situations on the basis of modern catastrophe theory methods). Morskoy vestnik, №1(45), pp.89–95.
2. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhlich V.P. (2013). Upravlenie i prinyatie resheniy pri kontrole ekspluatatsionnoy prochnosti sudna na osnove sovremennoy teorii katastrof (Management and decision-making in controlling the ship's operational strength based on modern catastrophe theory). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №1(19), pp.7–14.
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. (2017). Stsenarii gibeli nefte-rudovoza MV «Derbyshire» (Scenarios of the lost of the oil-ore carrier MV «Derbyshire»). Morskie intellektual'nye tekhnologii, №3(37), vol. 1, pp.17–22.
5. Burakovskiy E.P., Nechaev Yu.I., Burakovskiy P.E., Prokhlich V.P. Ekspluatatsionnaya prochnost' sudov (Operational strength of ships). Saint Petersburg, Lan', 2017. 404 p.
6. Kefart D, Chess D. (2003). Kontseptsiya samoreguliruyushchikhsya vychisleniy (The concept of intelligent computing) // Otkrytye sistemy, №2, pp.17-26.
7. Kolmogorov A.N. Teoriya informatsii i teoriya algoritmov (Information theory and theory of algorithms). Moscow, Nauka, 1987. 304 p.
8. Krasovskiy A.A., Naumov A.I. (2001). Analiticheskaya teoriya samoorganizuyushchikhsya sistem upravleniya s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta (Analytical theory of self-organizing control systems with a high level of artificial intelligence). Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, №1, pp. 69-75.
9. Kupriyanov M.S., Kochetkov A.V., Nesterova E.A., Artem'ev Yu.G. Algoritmy strukturnoy samoorganizatsii raspredelennykh sistem (Algorithms for structural self-organization of distributed systems). Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam SCM-2009. Vol.1. Saint Petersburg, 2009, pp. 211-213.
10. Neyrokomp'yutery v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka (Neurocomputers in the intellectual technologies of the XXI century). Editor Yu.I. Nechaev. Moscow, Ra-diotekhnika, 2011. 352 p.
11. Nechaev Yu.I. Modelirovanie ostoychivosti na volnenii (Modeling of stability on waves). Leningrad, Sudostroenie, 1989. 240 p.
12. 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.
13. Nechaev Yu.I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya (The topology of the nonlinear time-varying systems: theory and applications). Saint Petersburg, Art-Ekspress, 2015. 225 p.
14. Nechaev Yu.I. Neyrodinamicheskaya sistema pri funktsionirovanii virtual'nogo poligona na osnove metodov teorii katastrof (Neurodynamic system in the operation of a virtual polygon based on the methods of catastrophe theory). XVII Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Neyroinformatika-2015». Lektsii po neyroinformatike. Moscow, MIFI, 2015, pp. 220-273.
15. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii aktivnykh sistem (Course in the theory of active systems). Moscow, SINEG, 1999. 104 p.
16. Sinergeticheskaya paradigma. Mnogoobrazie poiskov i podkhodov (Synergetic paradigm. The variety of searches and approaches). Editors V.I. Arshinov, V.G. Budanov, V.E. Voytsekhovich. Moscow, Progress-Traditsiya, 2000. 536 p.
17. Solodovnikov V.V., Tumarkin V.I. Teoriya slozhnosti i proektirovanie sistem upravleniya (Complexity theory and design of control systems). Moscow, Nauka, 1990. 341 p.
18. Fominykh I.B. (1998) Integratsiya logicheskikh i obraznykh metodov otrazheniya informatsii v sistemakh iskusstvennogo intellekta (Integration of logical and imaginative methods of representing information in artificial intelligence systems). Novosti iskusstvennogo intellekta, №3, pp. 76-86.
19. Khaken G. Sinergetika: ierarkhii neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh (Synergetics: hierarchies of instabilities in self-organizing systems and devices). Moscow, Mir, 1985. 424p.

-
20. Chernyak L. (2004). Adaptiruemosť i adaptivnosť (Adaptability and adaptivity). Otkrytye systemy, №9, pp. 30-35.
 21. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
 22. Watanabe Iwao, Ohtsubo Hideomi (1998). Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 1. Estimation of wave loads. Marine Science and technology, Vol.3, No 4, pp. 171-180.
 23. Yao Tetsuya, Sumi Yoichi, Takemoto Hiroyasu, Kumano Atsushi, Sueoka Hidetoshi, Ohtsubo Hideomi (1998). Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 2. Estimation of the structural strength. Marine Science and technology, Vol.3, No 4, pp.181-193.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.01

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТОЙЧИВОСТИ СРЕДНИХ ТРАУЛЕРОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**Сергей Васильевич Дятченко**

доктор технических наук, заведующий кафедрой кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: svd.ks@mail.ru

Валерий Анатольевич Коробчинский

руководитель проекта судостроения ООО «Техцентр»
e-mail: val-kor@mail.ru

Александр Алексеевич Лисицин

студент магистратуры кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alexandr.lisitsin@mail.ru

Аннотация

Начиная с ранних стадий проектирования, проектант стремится обеспечить для нового проекта судна наилучшие мореходные качества. При решении задачи выбора варианта формы корпуса, первостепенное значение имеет его остойчивость, так как она определяет возможность самой эксплуатации судна. Для оценки остойчивости промысловых судов используют работы А.И. Ракова и Н.Б. Севастьянова, в которых определен диапазон возможных изменений соотношения ширины судна к его осадке и получена математическая модель достаточной остойчивости. Однако, применение этого методического обеспечения обуславливает большую трудоемкость работ, связанных с использованием методов вариаций и последовательных приближений и не позволяет в автоматизированном режиме выполнить оценку остойчивости по критерию погоды. Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки математических моделей для оценки остойчивости судов по критерию погоды, для эксплуатационных вариантов нагрузки масс. Целями исследований являлись создание расчетной базы и разработка математической модели для автоматизированного определения зависимости критерия погоды от соотношения ширины к осадке применительно к средним траулерам.

Ключевые слова: промысловое судно, математическая модель, форма корпуса, остойчивость.

MATHEMATICAL MODEL FOR THE MIDDLE TRAUILLERS STABILITY ESTIMATION AT THE EARLY STAGES OF THEIR DESIGN**Sergey V. Dyatchenko**

Dr.Sci.Tech., head of shipbuilding department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: svd.ks@mail.ru

Valeriy A. Korobchinskiy

head of the shipbuilding project Techcenter Ltd
e-mail: val-kor@mail.ru

Alexander A. Lisitsyn

MS student Shipbuilding department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: alexandr.lisitsin@mail.ru

Abstract

Starting from the early stages of design, the designer tend to ensure the best possible seaworthiness for a new vessel project. When solving the problem of choosing a variant of the hull shape, its stability is of paramount importance, since it determines the possibility of the operation of the vessel itself. To assess the stability of fishing vessels normally we use the work of Rakova A.I. and Sevastyanova N.B., in which the range of possible changes in the ratio of the width of the vessel to its draft was determined, and a mathematical model of sufficient stability was obtained. However, this methodological support application causes a high labor input connected with the use of methods of variations and successive approximations and does not allow to perform stability estimation according to weather conditions in an automated mode. The relevance of the studies is stipulated for the need to develop mathematical models for assessing the stability of vessels by the weather criterion, for operational versions of the mass load. The research objectives were the creation of a calculation base and the development of a mathematical model for the automated determination of the dependence of the weather criterion on the ratio of width to draft in relation to average trawlers.

Keywords: trawler, weather criterion, mathematical model, stability, mass load, width, draft, theoretical drawing (PM), curves of PM elements

Введение

Анализ технической литературы показал, что методология проектирования водоизмещающих судов изложена в работе [1,2]. Методические положения для определения мореходных качеств судов, в том числе остойчивости представлены в работах [3-9]. Методика проектирования рыболовных судов изложена в работе [8,].

Основная часть

Для исследования влияния соотношения ширины корпуса к его осадке на остойчивость судна, использовались три теоретических чертежа. Один чертеж являлся исходным для судна «Баренцево море», проект 1332, а два других были построены в соответствии с изменением ширины корпуса.. Исходные данные для судна типа «Баренцево море» проект 1332, представлены в табл. 1.

- разрабатывались расчетные модели на базе траулера типа «Баренцево море», включающие теоретический чертеж (ТЧ), кривые элементов ТЧ, нагрузку масс. для трех вариантов изменения ширины судна к его осадке;

- выполнялись исследования влияния соотношения ширины судна к его осадке (В/Т) на остойчивость траулера типа «Баренцево море» проект 1332.

- создавалась математическая модель, отражающая зависимость критерия погоды от отношения ширины среднего траулера к его осадке

Таблица 1

Исходные данные судна типа «Баренцево море» проект 1332

Наименование	Величина
Длина наибольшая, м	59,00
Длина между перпендикулярами, м	52,00
Ширина, м	13,00
Высота борта, м	8,90
Коэффициент общей полноты, δ	0,575
Водоизмещение по грузовую марку, т	1940
Осадка, м	4,87
Мощность ГД, л.с.	2200
Скорость хода, уз	13,3
Объем грузового трюма, M^3	493
Экипаж, чел	42
Район плавания	Неограниченный

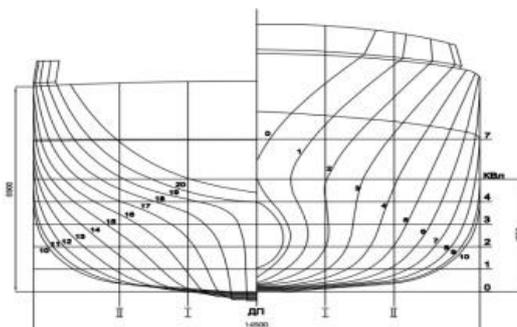


Рис.1. Теоретический чертеж корпуса судна В=14,5 м, В/Т=2,98

На рис. 2 показана диаграмма статической остойчивости судна типа «Баренцево море» шириной В =14,5 м, В/Т = 2,98, критерий погоды К=3,47. Так как критерий погоды, $K>1$, можно сделать вывод, что в данном случае судно является остойчивым и удовлетворяет требованиям Российского Морского Регистра Судоходства.

Теоретический чертеж корпуса судна шириной В =14,5 м, В/Т=2,98 показан на рис.1.

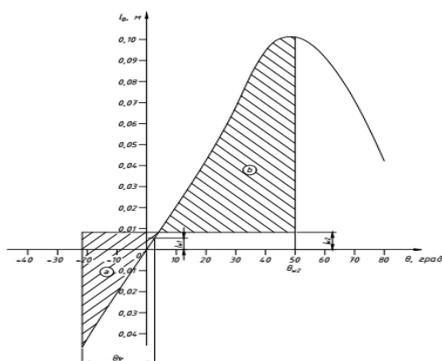


Рис.2. ДСО судна типа «Баренцево море» шириной 14,5 м, В/Т = 2,98

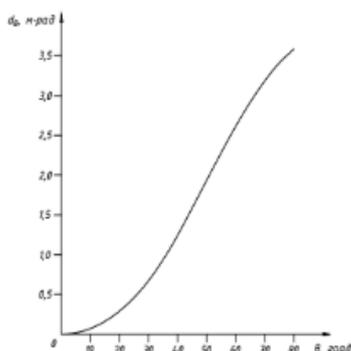


Рис.3. Диаграмма динамической остойчивости судна шириной 14,5 м, В/Т = 2,98

Из рис.2 видно, что остойчивость судна по критерию погоды $K = \frac{b}{a}$ достаточна, площадь b больше площади a , т.е. $K \geq 1$. На рис.3 приведена диаграмма динамической остойчивости судна типа «Баренцево море» шириной $B = 14,5$ м, $B/T = 2,98$.

В табл.2 приведены кривые элементов теоретического чертежа, построенные для судна шириной 14,5 метров. Используются следующие обозначения: T - осадка судна, м; V - объемное водоизмещение судна, M^3 ; x_c - абсцисса центра величины; z_c - аппликата центра величины; S - площадь ватерлинии, M^2 ; x_f - абсцисса центра тяжести площади ватерлинии; r_0 - поперечный метacentрический радиус, м; R_0 - продольный метacentрический радиус, м; δ , α , β - соответственно, коэффициент общей полноты, коэффициент полноты ватерлинии и коэффициент полноты мидель-шпангоута; z_{m0} - аппликата начального метacentра, м;

Таблица 2

Кривые элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) для судна шириной 14,5 метров.

T, м	M, т	V, M ³	x _c , м	z _c , м	S, M ²	x _f , м	r ₀ , м	R ₀ , м	z _{m0} , м	δ	α	β	См.пов., м ²
1	2	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16
2,0	6,5	6,4	1,22	5,71	20,9	2,75	31,42	20,2	14,85	4,220	5,550	7,460	10
2,4	8,3	8,1	2,34	6,83	22,0	2,42	27,87	17,0	13,88	4,470	5,830	7,800	11
2,8	10,1	9,9	2,83	7,96	22,9	1,74	25,26	14,7	13,29	4,680	6,080	8,070	12
3,2	12,1	11,8	2,89	9,08	23,8	0,88	23,20	13,1	12,91	4,880	6,310	8,290	13
3,6	14,1	13,7	2,55	10,20	24,8	-0,36	21,68	12,0	12,76	5,050	6,580	8,480	14
4,0	16,1	15,8	1,82	11,35	26,2	-2,28	20,51	11,9	12,74	5,220	6,950	8,630	15
4,4	18,4	17,9	0,54	12,52	27,8	-4,49	19,64	12,1	12,86	5,400	7,380	8,750	17
4,8	20,7	20,2	-1,02	13,70	29,2	-5,99	18,77	12,0	12,99	5,580	7,730	8,860	18
5,2	23,1	22,6	-2,60	14,89	30,2	-6,74	17,96	11,6	13,14	5,760	8,010	8,940	19
5,6	25,7	25,0	-4,05	16,08	31,1	-7,20	17,13	11,1	13,28	5,930	8,250	9,020	20
6,0	28,2	27,6	-5,36	17,26	31,9	-7,40	16,33	10,7	13,44	6,090	8,460	9,080	21
6,4	30,9	30,1	-6,49	18,44	32,6	-7,35	15,57	10,3	13,60	6,250	8,650	9,140	22
6,8	33,6	32,8	-7,43	19,62	33,3	-7,18	14,80	9,9	13,76	6,390	8,820	9,190	23
7,2	36,4	35,5	-8,21	20,79	33,9	-6,94	14,12	9,6	13,96	6,540	8,980	9,240	24
7,6	39,2	38,2	-8,84	21,95	34,5	-6,64	13,53	9,3	14,19	6,670	9,150	9,280	25
8,0	42,1	41,0	-9,34	23,11	35,1	-6,27	12,98	9,0	14,44	6,800	9,300	9,310	26
Кэф.	*100	*100	/5	/5	*20	/2	/5	*4	/2	/10	/10	/10	*50

В табл. 3 приведены нагрузки масс для судна типа «Баренцево море» при трех вариантах его ширины. Пересчет нагрузки масс судна типа «Баренцево море» с базового варианта, соответствующего ширине судна В=13 м, на варианты с шириной судна В=10 м и В=14,5 м осуществлялся с использованием методического обеспечения [5].

Аналогично, для исходного судна типа «Баренцево море», с шириной В=13 м и судна с шириной В=10 м, были определены кривые элементов теоретического чертежа и построены графики статической и динамической устойчивости. Как показана диаграмма статической устойчивости судна типа «Баренцево море» шириной В=13 м, В/Т = 2,67, критерий погоды К=2,97. Так как критерий погоды К>1, можно сделать вывод, что в данном случае судно является устойчивым и удовлетворяет требованиям Российского Морского Регистра Судоходства.

Для судна типа «Баренцево море» шириной В=10 м, В/Т = 2,05, критерий погоды К=0,88. Так как критерий погоды К<1, можно сделать вывод, что в данном случае судно не является

устойчивыми не удовлетворяет требованиям Российского Морского Регистра Судоходства

Выполненные исследования влияния соотношения В/Т корпуса на устойчивость судна, показали существенную зависимости коэффициента погоды от отношения ширины судна к его осадке. Проведя через три полученных точки полиномиальную линию тренда, изображенную на рис.4., получим уравнение зависимости коэффициента погоды К от отношения В/Т. Функциональная зависимость критерия погоды К от отношения В/Т для среднего двухпалубного траулера имеет вид:

$$K = -1,89 * \left(\frac{B}{T}\right)^2 + 12,294 * \left(\frac{B}{T}\right) - 16,378, (1)$$

Представленная выражением (1) зависимость критерия погоды К от отношения В/Т. позволяет проектанту при оптимизации формы корпуса двухпалубного траулера выбирать оправданные варианты, снизить трудоемкость исследований и избежать ошибок при проектировании.

Таблица 3

Нагрузка масс для судна типа «Баренцево море» при трех вариантах его ширины

№	Наименование	Обозначение	В=10 м Вес, т	В=13 м Вес, т	В=14,5м Вес, т
1	2	3	4	5	6
Кр	Корпус	P ₁	679,72	850,00	934,33
I	Корпус металлический	P ₁₁	411,11	532,00	593,12
1	Наружная обшивка и 2-е дно	P ₁₁₁	149,16	184,50	200,80
2	Палубы и платформы основного корпуса	P ₁₁₂	89,94	127,50	147,43
3	Главные и продольные переборки	P ₁₁₃	55,33	76,20	87,06
4	Надстройки, рубки и мачты	P ₁₁₄	46,22	52,70	55,66
5	Прочие конструкции металлического корпуса	P ₁₁₅	70,46	91,10	102,17
II	Подкрепления и фундаменты	P ₁₂	20,27	25,00	27,28
III	Дельные вещи	P ₁₃	24,07	27,00	28,34
1	Крышки грузовых люков	P ₁₃₁	3,20	3,20	3,20
IV	Покрытия и окраска	P ₁₄	32,29	38,80	41,88
V	Изоляция и зашивка помещений	P ₁₅	84,84	99,30	106,02
1	Изоляция тепловая, звуковая, и т.д.	P ₁₅₁	9,23	10,80	11,53
VI	Оборудование помещений, постов	P ₁₆	105,60	125,90	135,46
VII	Прочие конструкции корпуса	P ₁₇	1,54	2,00	2,23
СУ	Судовые устройства	P ₂	100,25	121,50	132,05
I	Устройство рулевое и подруливающее	P ₂₁	18,70	18,70	18,70
II	Устройство якорное	P ₂₂	19,20	24,00	26,33

III	Устройство швартовное, буксирное	P ₂₃	3,66	4,70	5,21
IV	Устройство шлюпочное, спасательное	P ₂₄	2,50	2,50	2,50
V	Устройство грузовое	P ₂₅	7,57	8,40	8,82
1	Грузовые краны, стрелы и лебедки	P ₂₅₁	4,80	4,80	4,80
2	Прочие конструкции грузового устройства	P ₂₅₂	2,77	3,60	4,02
VI	Прочие судовые устройства	P ₂₆	48,62	63,20	70,49
Ст	Общесудовые системы	P ₃	72,81	92,20	101,72
Мш	Установка главная энергетическая	P ₄	177,80	177,80	177,80
I	Главные двигатели	P ₄₁	129,20	129,20	129,20
II	Движители	P ₄₂	25,00	25,00	25,00
III	Системы главной и вспомогательной ЭУ	P ₄₃	19,10	19,10	19,10
IV	Прочие механизмы ГЭУ	P ₄₄	4,50	4,50	4,50
Эл	Электроэнергетическая установка, связь и управление	P ₅	58,07	65,80	69,54
I	Источники электроэнергии (ДГР)	P ₅₁	25,40	25,40	25,40
Вр	Вооружение	P ₆	7,24	8,70	9,39
Сн	Снабжение и имущество	P ₉	11,32	13,50	14,52
Жр	Жидкие грузы, воздух в корпусе	P ₁₀	29,92	38,90	43,39
	Итого порожнем	D ₀	1137,13	1368,40	1438,60
	Дедвейт	D _W	233,92	549,42	571,89
	Водоизмещение судна	D	1371,05	1940,29	1988,02

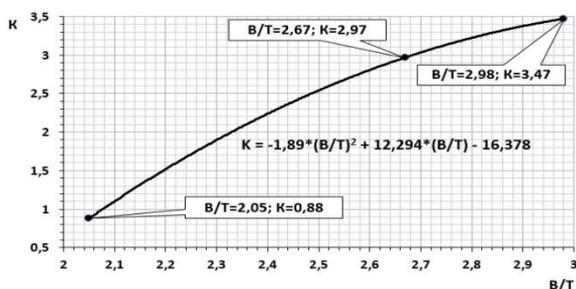


Рис.4 Зависимость коэффициента погоды K от отношения В/Т.

Заключение

1. Для определения характеристик остойчивости судна при изменении отношения его его ширины к осадке разработаны расчетные модели на базе траулера типа «Баренцево море», включающие теоретический чертеж (ТЧ), кривые элементов ТЧ, нагрузку масс, соответствующих варианту выхода на промысел.

2. Выполнены исследования влияния соотношения B/T на остойчивость траулера типа «Баренцево море» проект 1332.

3. Получена математическая модель, зависимость критерия погоды от отношения ширины среднего траулера к его осадке

Литература

1. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. Т.1. Описание системы «Корабль». 819 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. – Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». 812 с.
3. Маков Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? / Ю.Л. Маков. СПб.: Судостроение, 2005. 314 с.
4. Малышев А.Н. Плавуность и остойчивость промысловых судов /А.Н. Малышев. М.: Мир.2003. 272 с.
5. Маслюк Е.В. Проектирование морских судов. Расчеты нагрузки масс водоизмещения порожнем судов различного назначения / Е.В. Маслюк, А.Ф. Иконников, Калининград, Изд. ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2008. 47 с.
6. Мореходность судов м средств океанотехники. Методы оценки: Монография / научный редактор И.К. Бородай / ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПб., 2003. -256 с.
7. Ногид Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа / Л.М. Ногид. Л.: Судпромгиз, 1962. 243 с.
8. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов. Л.: Судостроение, 1981. 376 с.

9. Севастьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов. Л., Судостроение, 1970. -200 с.

References

1. Gaykovich, A.I. Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons.Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.1., Description of the system "Ship", 819 p.
2. Gaikovich, AI Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons. Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.2., Analysis and synthesis of the "Ship" system, 812 p.
3. Makov Yu.L. Stability ... What is it? Yu.L. Makov. - SPb .: Shipbuilding, 2005. 314 p.
4. Malyshev A.N. Buoyancy and stability of fishing vessels / A.N. Malyshev . M .: Mir.2003. 272 sec.
5. Maslyuk E.V. Designing of sea-going ships. Calculations of the load of masses of displacement of empty vessels for various purposes. E.V. Maslyuk, A.F. Ikonnikov. Kaliningrad, Izd. FGBOU HPE "KSTU", 2008. 47 with.
6. Seaworthiness of ships and means of ocean technology. Methods of evaluation: Monograph. scientific editor I.K. Boroday. FSUE "Krylov State Research Center", St. Petersburg, 2003. 256 p.
7. Nogid LM Designing the vessel shape and constructing a theoretical drawing. LM. Nogid .L .: Sudpromgiz, 1962. 243 p.
8. Rakov A.I. Design of fishing vessels. A.I. Rakov, N.B. Sevastyanov . L .: Shipbuilding, 1981. 376 p.
9. Sevastianov NB Stability of fishing vessels. L., Shipbuilding, 1970. 200 p.

УДК 629.5.01

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАУЛЕРОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ИХ РАЗМЕРНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ

Сергей Васильевич Дятченко

доктор технических наук, заведующий кафедрой кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: svd.ks@mail.ru

Сергей Валерьевич Тананыкин

доцент кафедры инженерной механики
Калининградский государственный технический университет
236029, г. Калининград, Молодежная, 6
e-mail: poleks@mail.ru

Аннотация

В последние годы большое число морских судов разных типов и назначения, в том числе и промысловых, подвергаются модернизации с изменением основных элементов. Такое направление поддержания и увеличения эффективности стареющего промыслового флота является для судовладельца актуальным по нескольким причинам: недостаточно финансовых средств компании для самостоятельного обновления флота; моральное старение нового судна обгоняет его физическое старение, изменение эксплуатационных условий (района промысла, объекта лова), требующих от судовладельца быстрого реагирования. Поэтому, для дальнейшего успешного развития этого направления необходимо методическое обеспечение, которое позволит судовладельцу выбрать наилучший вариант, определить разумные объемы модернизации и определить качества проекта суда в соответствии с техническим заданием. Целями работы являлись разработка структурной схемы алгоритма и математических моделей, позволяющих судовладельцу определить основные элементы и характеристики судна на ранних стадиях его размерной модернизации для обеспечения мореходных, прочностных, вибрационных и экономических показателей судна. Представленная в работе совокупность математических моделей позволяет определить основные элементы и характеристики модернизированного судна с учетом данных исходного судна.

Ключевые слова: промысловое судно, корпус, алгоритм, математическая модель, модернизация, вибрация, прочность, плавучесть, остойчивость, экономическая эффективность.

MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATION OF TECHNO-ECONOMIC CHARACTERISTICS OF TRAUILLERS AT THE EARLY STAGES OF THEIR MODERNIZATION

Sergey V. Dyatchenko

Dr.Sci.Tech., head of shipbuilding department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: svd.ks@mail.ru

Sergey V. Tananykin

associate professor of the department of engineering mechanics
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: poleks@mail.ru

Abstract

In recent years, a large number of sea vessels of different types and purposes, including fishing vessels, are under the process of modernization with the change of basic elements. This direction of maintaining and increasing the efficiency of the aging fishing fleet is relevant for the ship owners for several reasons: the company's financial resources are not sufficient to update the fleet independently; the obsolescence of a new vessel outruns its physical aging, a change in the operating conditions (fishing area, fishing site) requiring the ship owner to react quickly. Therefore, for the further successful development of this direction, it is necessary to provide methodological support that will allow the ship owner to choose the best option, determine reasonable amounts of modernization and determine the

quality of the vessel draft in accordance with the terms of reference. The objectives of the work were the development of a structural diagram of the algorithm and mathematical models that allow the ship owner to identify the main elements and characteristics of the ship in the early stages of its dimensional modernization to ensure the vessel's seaworthiness, strength, vibration and economic parameters. The set of mathematical models presented in the work allows us to determine the main elements and characteristics of the modernized vessel, taking into account the data of the given ship.

Key words: commercial ship, hull, algorithm, mathematical model, modernization, vibration, strength, buoyancy, stability, economic efficiency.

Введение

Анализ технической литературы показал, что методические основы борьбы с вибрацией даны в работе [1], а методология проектирования водоизмещающих судов изложена в работе [2,3]. Методические положения для определения элементов судна при его размерной модернизации представлены в работе [4]. В работах [5-7] даны основы проектного обеспечения норм вибрации на рыболовных судах и результаты исследований вибрации. Методики проектирования рыболовных судов изложены в работах [8,11]. Также известен способ реконструкции судна путем размерной модернизации [9] и модели для пересчета нагрузки масс в [10].

Определена актуальность создания более полного методического обеспечения для определения основных элементов и характеристик траулера на ранних стадиях его размерной модернизации. В связи с этим, в работе решались следующие задачи:

- разрабатывался алгоритм определения характеристик и элементов модернизируемого Траулера с учетом требований к технико-экономическим показателям;
- выбирался и обосновывался критерий для определения экономической эффективности рассматриваемых вариантов модернизации промыслового судна;
- разрабатывалась общая структура математической модели для обеспечения размерной модернизации судна, в состав которой также введены, ранее полученные математические модели, смотри [8];
- разрабатывалась математическая модель для определения характеристик общей прочности корпуса при изменении длины модернизируемого судна;
- разрабатывалась математическая модель для определения частот собственных колебаний корпуса при изменении длины модернизируемого судна;
- разрабатывалась математическая модель оптимизации подсистем «корпус-главная энергетическая установка-двигатель».

1. Основная часть

Для решения проектных задач на ранних стадиях модернизации промыслового судна разработан алгоритм, структурная схема которого показана на рис. 1.

Известные величины определены техническим заданием на проектирование. К

ним относятся: грузоподъемность, грузместимость, скорость хода, автономность плавания по запасам, время инвестиции судна и нормативные величины, представленные Правилами РМРС. К числу неизвестных, которые необходимо определить, разрабатывая проект модернизации промыслового судна относятся: водоизмещение и главные размерения судна, коэффициенты формы корпуса, мощность главных двигателей, осадка при водоизмещении судна порожнем и с полным грузом, запасы, определяющие автономность плавания, характеристики конструктивного мидель-шпангоута, величины, характеризующие прочность и вибрацию судна.

Выбор критерия для определения экономической эффективности при модернизации промыслового судна зависит от компетенции заказчика. В качестве показателя (критерия) сравнения при выборе различных инвестиционных проектов (или вариантов проекта) используют чистый дисконтированный доход (ЧДД); индекс доходности; внутреннюю норму доходности; срок окупаемости.

При использовании показателей для сравнения различных инвестиционных проектов (вариантов проекта) они должны быть приведены к сопоставимому виду. Учитывая то, что сравниваемые варианты проекта являются легко сопоставимыми, так как связаны с одной отраслью, одной организацией и рассчитаны на одинаковый срок реализации целесообразно, сравнивать их по максимальному значению чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^n (P_t - Z_t) \cdot \alpha_t - K_{\text{диск}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где P_t – результаты, достигаемые на t -м шаге расчета; Z_t – затраты на t -м шаге при условии, что в них не входят амортизационные начисления; α_t – коэффициент дисконтирования; $K_{\text{диск}}$ – сумма дисконтированных капиталовложений.

Коэффициент дисконтирования α_t определяется по формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^{t-1}}, \quad (2)$$

где E – ставка дисконтирования; t – шаг дисконтирования.

Сумма дисконтированных капиталовложений $K_{\text{диск}}$ определяется по формуле:

$$K_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^n K_t \frac{1}{(1-E)^t}, \quad (3)$$

где K_t – единовременные затраты.

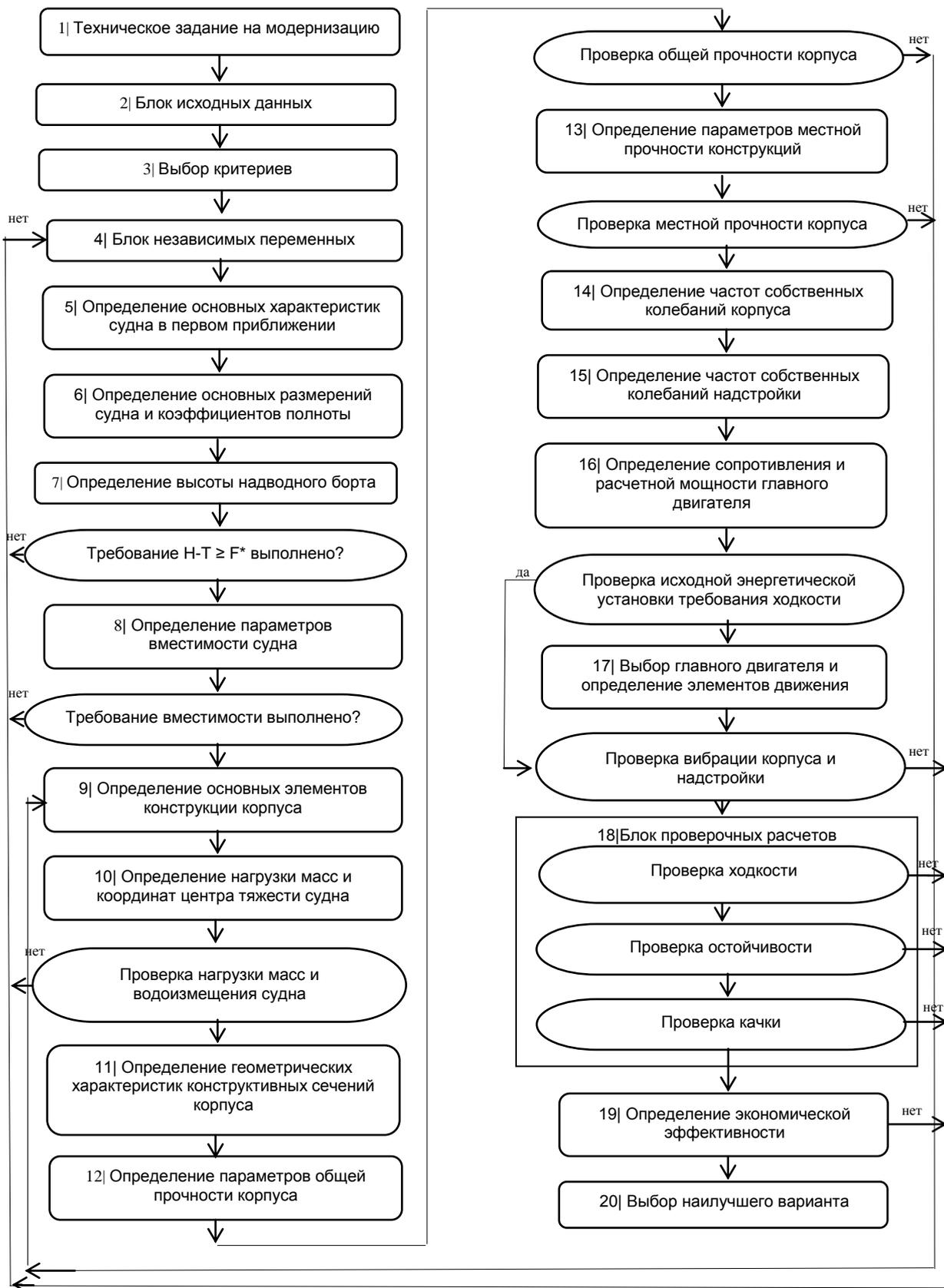


Рис. 1. Структурная схема алгоритма размерной модернизации промышленного судна

При этом необходимо контролировать внутреннюю норму доходности (ВНД) проектов, так как она является определяющим условием получения банковских кредитов под проект. Оценка предстоящих затрат и результатов при определении эффективности инвестиционного проекта осуществляется в пределах расчетного периода, продолжительность которого можно принять с учетом: продолжительности создания и эксплуатации объекта; нормативного срока технологического оборудования и достижения заданных характеристик прибыли.

Учитывая современное техническое состояние промыслового флота и специфику отрасли, целесообразно при определении эффективности рассматривать пятнадцатилетний срок эксплуатации модернизированного судна, а шаг расчета при определении показателей эффективности принять равным одному году. Оптимальное решение определяется по значению критерия экономической эффективности с учетом принятых технических показателей.

В математической модели для определения водоизмещения судна и его расчетной длины используют уравнения, имеющие вид:

$$D = k\rho\delta_0 L_0 B_0 T_0 + \Delta D_s = k\rho\delta LBT, \quad (4)$$

$$L = L_0 + \Delta L, \quad (5)$$

где ΔD_s – массовое водоизмещение вставки; ΔL – длина вставки, м; k – коэффициент выступающих частей;

- уравнение масс

$$D_{пор} = D_{пор0} + P_{дб} + P_{yc} - P_{дэ}, \quad (6)$$

где $D_{пор}$, $D_{пор0}$ – соответственно, массовое водоизмещение реконструированного и исходного судна порожнем, т; $P_{дб}$ – масса дополнительного блока, т; P_{yc} – масса устанавливаемого оборудования в корпусе исходного судна, т; $P_{дэ}$ – масса демонтируемых элементов, т.

Массы устанавливаемого и демонтируемого оборудования, механизмов, устройств и систем, а также дополнительная масса топлива и снабжения определяются в соответствии с техническим заданием.

Объемное водоизмещение цилиндрической вставки состоит [3]:

$$\Delta D_s = \Delta D_z + \Delta D_n, \quad (7)$$

где ΔD_z – дополнительное водоизмещение для поддержания грузов, M^3 ; ΔD_n – потерянное водоизмещение от повышения высоты надводного борта при увеличении длины судна M^3 .

Водоизмещающий объем вставки имеет вид:

$$\Delta D_s = \Delta LTB\beta \quad (8)$$

где T – осадка судна после удлинения; β – коэффициент полноты мидель-шпангоута. Осадка судна после удлинения определяется по формуле [3]:

$$T = T_0 - \alpha_\beta \Delta L, \quad (9)$$

где α_β – увеличение высоты борта при удлинении судна на 1 м, которое определяется по таблицам в соответствии с «Правилами о грузовой марке морских судов».

Высоту надводного борта определяют по формуле [3]:

$$F = F_0 + \alpha_\beta \Delta L, \quad (10)$$

где F_0 – высота борта исходного судна.

Потерянный объем от повышения высоты надводного борта при увеличении длины судна имеет вид:

$$\Delta D_n = S_0 \Delta T = \alpha_0 L_0 B_0 \alpha_\beta \Delta L, \quad (11)$$

где S_0 – площадь грузовой ватерлинии до удлинения; α_0 – коэффициент полноты площади ватерлинии.

Коэффициент общей полноты судна можно определить, используя уравнение плавучести (4) и выражение (8):

$$\delta = \left(\frac{L_0}{L_0 + \Delta L} \right) \cdot \left(\delta_0 \frac{T_0}{T} + \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{\beta_0}{k} \right), \quad (12)$$

где β_0 – коэффициент полноты мидель-шпангоута исходного судна, принятого в предположении, что для БМРТ и РТМС $\beta_0 = \beta$.

Определяют основные элементы конструкции вставки и выполняют расчет координат центра тяжести судна, соответствующих водоизмещению порожнем и в других, регламентируемых РМРС состояниях загрузки судна.

Координаты центра тяжести реконструируемого судна порожнем имеют вид

$$x_{gпор} = \frac{D_{пор0} \cdot x_{gi} + \sum P_i \cdot x_i}{D_{пор}}, \quad (13)$$

$$z_{gпор} = \frac{D_{пор0} \cdot z_{gi} + \sum P_i \cdot z_i}{D_{пор}}, \quad (14)$$

Координаты центра тяжести x_{gi} и z_{gi} разделенного и раздвинутого исходного судна определяются по формулам

$$x_{gi} = x_{g0} + \Delta x \frac{D_n - D_k}{D_{пор0}}, \quad (15)$$

$$z_{gi} = z_{g0} + \Delta z \frac{D_n - D_k}{D_{пор0}}, \quad (16)$$

где D_n , D_k – соответственно, массы носовой и кормовой частей судна, т; x_{g0} , z_{g0} – соответственно, абсцисса и аппликата центра тяжести судна до реконструкции, м.; Δx , Δz – соответственно, проекция перемещения частей судна на ось абсцисс и ось аппликат.

Координаты ЦТ судна в грузу имеют вид

$$x_g = \frac{D_{пор0} \cdot x_{gпор} + \sum M_j \cdot x_j}{D}, \quad (17)$$

$$z_g = \frac{D_{пор0} \cdot z_{gпор} + \sum M_j \cdot z_j}{D}, \quad (18)$$

Решают задачу размещения экипажа, оборудования, судового и промыслового снабжения, грузов и запасов в количестве,

обеспечивающем нормальную эксплуатацию судна в соответствии с ТЗ:

- уравнение вместимости

$$V_{к0} + V_H + V_S = \sum V_i, \quad (19)$$

где $V_{к0}$ - вместимость корпуса до удлинения, м³; V_H - вместимость надстроек, м³; V_S - вместимость корпуса цилиндрической вставки, м³; $\sum V_i$ - требуемые составляющие вместимости судна, м³.

Определяют геометрические характеристики конструктивных сечений и проверяют общую прочность в соответствии с правилами РМРС.

Определяют величину нормальных напряжений в связях конструктивного мидель-шпангоута модернизируемого судна, при его размерном удлинении, используя формулу:

$$\sigma_H = K_1 K_2 K_3 \sigma_0, \quad (20)$$

где σ_H, σ_0 - напряжения в связях конструктивного мидель-шпангоута модернизированного и исходного судна, МПа; $K_1 = M_W/M_{W0}$ - коэффициент, учитывающий изменение величины волнового изгибающего момента; $K_2 = M_{свн}/M_{св0}$ - коэффициент, учитывающий изменение изгибающего момента на тихой воде; $K_3 = I_0/I_H$ - коэффициент, учитывающий изменение величины момента инерции конструктивного мидель-шпангоута исходного и модернизированного судов.

Коэффициенты редуцирования, учитывающие изменение волнового изгибающего момента при перегибе и прогибе судна, имеют следующий вид:

при перегибе судна

$$K_1 = M_W/M_{W0} = \frac{C_{свн}}{C_{св0}} \cdot \frac{\delta_H}{\delta_0} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0}\right)^2; \quad (21)$$

при прогибе судна

$$K_1 = M_W/M_{W0} = \frac{C_{свн}}{C_{св0}} \cdot \frac{(\delta_H+0,7)}{(\delta_0+0,7)} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0}\right)^2. \quad (22)$$

Анализ волновых коэффициентов модернизированного и исходного судна на примере БМРТ типа «ПУЛКОВСКИЙ МЕРЕДИАН» показал, что при увеличении расчетной длины судна с 96,4 до 115,68 их отношение $C_{свн}/C_{св0}$ составит 1,05. Отношение L_H/L_0 составляет 1,2. Для проектного обеспечения можно использовать график изменения отношения δ_H/δ_0 от изменения расчетной длины судна.

Коэффициент редуцирования, учитывающий изменение изгибающего момента на тихой воде будет иметь следующий вид:

$$K_2 = M_{свн}/M_{св0} = \frac{T_H}{T_0} \cdot \frac{\delta_H}{\delta_0} \cdot \frac{k_{свн}}{k_{св0}} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0}\right)^2. \quad (23)$$

С учетом (21-23) формулы для определения нормальные напряжений в миделевом сечении модернизируемого судна при его размерном удлинении имеют вид:

при перегибе судна

$$\sigma_H = \sigma_0 \cdot \frac{I_0}{I_H} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0}\right)^2 \cdot \left[\frac{\delta_H}{\delta_0} + \frac{C_{свн}}{C_{св0}} + \frac{T_H}{T_0} + \frac{k_{свн}}{k_{св0}}\right]; \quad (24)$$

при прогибе судна

$$\sigma_H = \sigma_0 \cdot \frac{I_0}{I_H} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0}\right)^2 \cdot \left[\frac{\delta_H+0,7}{\delta_0+0,7} + \frac{C_{свн}}{C_{св0}} + \frac{T_H}{T_0} + \frac{k_{свн}}{k_{св0}}\right]. \quad (25)$$

Определяют величину касательных напряжений в модернизируемом судне, при его размерном удлинении, используя формулу:

$$\tau_H = K_3 \cdot K_4 \cdot \tau_0, \quad (26)$$

где τ_0 - касательные напряжения в конструкции корпуса исходного судна, МПа; τ_H - касательные напряжения в конструкции корпуса модернизируемого судна, МПа; $K_3 = N_H/N_0$ - коэффициент редуцирования, учитывающий изменение величины перерезывающей силы в рассматриваемом сечении корпуса; $K_4 = (S_{ин} \cdot \Sigma t_{кн} \cdot I_0)/(S_{и0} \cdot \Sigma t_{и0} \cdot I_H)$ - коэффициент редуцирования, учитывающий изменение корпуса рассматриваемого сечения.

Коэффициент редуцирования величины перерезывающей силы на тихой воде можно представить в виде:

$$K_3 = N_{свн}/N_{св0} = \frac{T_H}{T_0} \cdot \frac{\delta_H}{\delta_0} \cdot \frac{k_{свн}}{k_{св0}} \cdot \frac{L_H}{L_0}, \quad (27)$$

Коэффициенты редуцирования, учитывающие изменение волновой перерезывающей силы, имеют следующий вид:

$$K_3 = N_{свн}/N_{св0} = \frac{C_{свн}}{C_{св0}} \cdot \frac{(\delta_H+0,7)}{(\delta_0+0,7)} \cdot \frac{L_H}{L_0}. \quad (28)$$

Величину касательных напряжений в расчетном сечении модернизируемого судна при его размерном удлинении можно оценить по известным данным для исходного судна:

$$\tau_H = \tau_0 \cdot \frac{I_0}{I_H} \cdot \frac{L_H}{L_0} \cdot \left(\frac{S_{ин} \cdot \Sigma t_{кн}}{S_{и0} \cdot \Sigma t_{и0}}\right) \cdot \left[\frac{\delta_H+0,7}{\delta_0+0,7} + \frac{C_{свн}}{C_{св0}} + \frac{T_H}{T_0} + \frac{k_{свн}}{k_{св0}}\right], \quad (29)$$

Анализ полученной формулы показал, что при близких значениях моментов инерции исходного и модернизируемого судна, а также числовых значениях $k_{св}$, расчетная формула существенно упростится и может быть использована для оценки прочности в математической модели определения оптимальных проектных характеристик судна на ранних стадиях его модернизации в виде:

$$\tau_H = \tau_0 \cdot \frac{L_H}{L_0} \cdot \left[\frac{\delta_H+0,7}{\delta_0+0,7} + \frac{C_{свн}}{C_{св0}} + \frac{T_H}{T_0}\right], \quad (30)$$

Определяют общую прочность корпуса судна по предельным моментам при прогибе и перегибе судна:

$$M_{пр} = \pm 10^{-3} R_{eH} W, \quad (31)$$

где $M_{пр}$ - предельный момент, кНм; R_{eH} - предел текучести материала, МПа; W - фактический момент сопротивления днища или палубы, м³.

Редуцируют гибкие связи корпуса и определяют фактические моменты сопротивления днища и палубы по формулам:

$$W_{д} = I_{з}/z_0, \quad (32)$$

$$W_{\pi} = I_{\pi}/(H - z_0), \quad (33)$$

где W_{π}, W_{π} -соответственно, фактический момент сопротивления днища и палубы, M^2 ; z_0 -отстояние нейтральной оси от основной плоскости, м; H – высота борта до палубы, м.

Расчетный изгибающий момент модернизируемого судна M_{π} при прогибе и перегибе можно представить через изгибающий момент M_0 исходного судна в виде:
при перегибе судна

$$M_{\pi} = M_0 \cdot \left(\frac{L_M}{L_0}\right)^2 \cdot \left[\frac{\delta_M}{\delta_0} + \frac{C_{VM}}{C_{V0}} + \frac{T_M}{T_0}\right], \quad (34)$$

при прогибе судна

$$M_{\pi} = M_0 \cdot \left(\frac{L_M}{L_0}\right)^2 \cdot \left[\frac{\delta_M+0,7}{\delta_0+0,7} + \frac{C_{VM}}{C_{V0}} + \frac{T_M}{T_0}\right], \quad (35)$$

Определяют частоту собственных колебаний корпуса исходного судна, по первому тону, используя формулы:

$$\lambda_{\varepsilon 0} = \frac{3,4}{\sqrt{1,2 + \frac{B}{3T}}} \sqrt{\frac{EI_{\varepsilon}}{DL^2}}; \quad (36) \quad \lambda_{\varepsilon 0} = \frac{3,0}{\sqrt{1,3 + \frac{T}{\varepsilon B}}} \sqrt{\frac{EI_{\varepsilon}}{DL^2}}; \quad (37)$$

где: $\lambda_{\varepsilon 0}, \lambda_{\varepsilon 0}$ - частоты собственных колебаний корпуса по первому тону, в вертикальном и горизонтальном направлениях, Гц; $I_{\varepsilon}, I_{\varepsilon}$ – моменты инерции конструктивного мидель-шпангоута, в вертикальном и горизонтальном направлениях, M^4 ; L, B, T – соответственно длина, ширина и осадка судна, м; D – водоизмещение судна, т; E – модуль упругости, H/M^2 .

Для первого тона определяют коэффициенты для пересчета частот собственных колебаний модернизируемого судна по частоте собственных колебаний исходного судна в виде:

$$K_{1\varepsilon} = \left(\frac{k_M}{k_0}\right) \cdot \left(\frac{L_0}{L_M}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_M}{I_0}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{B_0 \cdot T_0 \cdot \delta_0}{B_M \cdot T_M \cdot \delta_M}} \cdot \sqrt{\frac{1,2 + (B_0/3T_0)}{1,2 + (B_M/3T_M)}}. \quad (38)$$

$$K_{1\varepsilon} = \left(\frac{k_M}{k_0}\right) \cdot \left(\frac{L_0}{L_M}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_M}{I_0}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{B_0 \cdot T_0 \cdot \delta_0}{B_M \cdot T_M \cdot \delta_M}} \cdot \sqrt{\frac{1,2 + (T_0/3B_0)}{1,2 + (T_M/3B_M)}}. \quad (39)$$

Анализ выражений (40) и (41) показал, что если коэффициент общей полноты для больших и крупных рыболовных судов увеличивается при модернизации на 10% (например, с 0.6 до 0.66), то корень их отношения составит множитель 0,949. Аналогично, корень отношения осадок до и после модернизации при 10% их изменении составит 1,044. Если при размерной модернизации, за счет установки цилиндрической вставки ширина судна остается без изменения, а жесткость цилиндрической вставки соответствует жесткости миделевого сечения судна до модернизации, то коэффициент пересчета имеет вид:

$$K_1 = \left(\frac{k_M}{k_0}\right) (L_0/L_M)^2, \quad (40)$$

С учетом выражения (42) частота собственных колебаний модернизируемого судна будет иметь следующий вид:

$$\lambda_M = \lambda_0 \left(\frac{k_M}{k_0}\right) \cdot (L_0/L_M)^2, \quad (41)$$

Определяют частоты собственных колебаний корпуса модернизированного судна.

- частота собственных колебаний корпуса первого тона

$$\lambda_{1ME} = k_{ME} \lambda_{1\varepsilon}; \quad \lambda_{1ME} = k_{ME} \lambda_{1\varepsilon}, \quad (42)$$

где $\lambda_{1ME}, \lambda_{1ME}$ - частоты собственных вертикальных и горизонтальных колебаний корпуса модернизированного судна, Гц; $\lambda_{1ME}, \lambda_{1ME}$ - частоты собственных вертикальных и горизонтальных колебаний корпуса исходного судна, Гц; k_{ME}, k_{ME} – коэффициенты, учитывающие изменение частот собственных колебаний корпуса;

- частота колебаний корпуса высших тонов

$$\lambda_{i\varepsilon} = k_{i\varepsilon} \cdot \lambda_{1\varepsilon}, \quad \lambda_{i\varepsilon} = k_{i\varepsilon} \cdot \lambda_{1\varepsilon}, \quad (43)$$

где $\lambda_{i\varepsilon}, \lambda_{i\varepsilon}$ - частоты собственных колебаний высших тонов, Гц; i – номер тона; $k_{i\varepsilon}, k_{i\varepsilon}$ - числовой коэффициент, зависящий от номера тона, типа судна и вида рассматриваемых колебаний (вертикальные или горизонтальные).

Определяют частоту собственных колебаний надстройки по первому тону, используя методическое обеспечение представленное в работе [1].

Определяют сопротивление воды движению судна, буксировочную мощность и необходимая мощность главного двигателя:

- уравнение ходкости

$$N_{\varepsilon 0} = \frac{N_{\varepsilon}}{\eta \eta_{\varepsilon}}, \quad (44)$$

где $N_{\varepsilon 0}$ – суммарная мощность главных двигателей, кВт; N_{ε} - буксировочная мощность судна, кВт; η - пропульсивный коэффициент; η_{ε} – коэффициент, учитывающий потери на валопроводы, редуктора и т.д.

Проверяют исходную энергетическую установку требованиям к ходкости. Неудовлетворение этих требований предусматривает замену энергетической установки. Выбирают новый главный двигатель с запасом по мощности не менее 15%. Выполняют расчеты, связанные с определением характеристик и элементов гребного винта. Уточняют массы судовой энергетической установки и судовых энергетических запасов. Выполняют уточнение водоизмещения и главных размерений судна.

При условии обеспечения требований к ходкости, выполняют проверку отсутствия резонансных колебаний корпуса (по первым трем тонам) и надстройки, путем сопоставления их частот с частотами возмущающих сил от главного двигателя и гребного винта.

1) сопоставление частот собственных колебаний корпуса с частотами возмущающих сил по первому тону:

$$\begin{aligned} \omega_{\partial} &\geq K_1 \cdot \lambda_{\partial(1)}; & \omega_{\partial} &\geq K_1 \cdot \lambda_{z(1)}; \\ \omega_{\varepsilon} &\geq K_1 \cdot \lambda_{\varepsilon(1)}; & \omega_{\varepsilon} &\geq K_1 \cdot \lambda_{z(1)}. \end{aligned} \quad (45)$$

или

$$\begin{aligned} \omega_{\partial} &\leq K_1^* \cdot \lambda_{\partial(1)}; & \omega_{\partial} &\leq K_1^* \cdot \lambda_{z(1)}; \\ \omega_{\varepsilon} &\leq K_1^* \cdot \lambda_{\varepsilon(1)}; & \omega_{\varepsilon} &\leq K_1^* \cdot \lambda_{z(1)}. \end{aligned} \quad (46)$$

2) сопоставление частот собственных колебаний корпуса с частотами возмущающих сил по второму тону:

$$\begin{aligned} \omega_{\partial} &\geq K_2 \cdot \lambda_{\partial(2)}; & \omega_{\partial} &\geq K_2 \cdot \lambda_{z(2)}; \\ \omega_{\varepsilon} &\geq K_2 \cdot \lambda_{\varepsilon(2)}; & \omega_{\varepsilon} &\geq K_2 \cdot \lambda_{z(2)}. \end{aligned} \quad (47)$$

или

$$\begin{aligned} \omega_{\partial} &\leq K_2^* \cdot \lambda_{\partial(2)}; & \omega_{\partial} &\leq K_2^* \cdot \lambda_{z(2)}; \\ \omega_{\varepsilon} &\leq K_2^* \cdot \lambda_{\varepsilon(2)}; & \omega_{\varepsilon} &\leq K_2^* \cdot \lambda_{z(2)}. \end{aligned} \quad (48)$$

3) сопоставление частот собственных колебаний корпуса с частотами возмущающих сил по третьему тону:

$$\begin{aligned} \omega_{\varepsilon n1} &\geq K_3 \cdot \lambda_{\varepsilon(3)}; & \omega_{\varepsilon n1} &\geq K_3 \cdot \lambda_{z(3)}; \\ \omega_{\varepsilon n2} &\geq K_3 \cdot \lambda_{\varepsilon(3)}; & \omega_{\varepsilon n2} &\geq K_3 \cdot \lambda_{z(3)}. \end{aligned} \quad (49)$$

или

$$\begin{aligned} \omega_{\varepsilon n1} &\leq K_3 \cdot \lambda_{\varepsilon(3)}; & \omega_{\varepsilon n1} &\leq K_3 \cdot \lambda_{z(3)}; \\ \omega_{\varepsilon n2} &\leq K_3 \cdot \lambda_{\varepsilon(3)}; & \omega_{\varepsilon n2} &\leq K_3 \cdot \lambda_{z(3)}. \end{aligned} \quad (50)$$

где (1), (2), (3) – индексы соответствующие первым трем тонам колебаний корпуса; $\omega_{\partial}, \omega_{\varepsilon}, \omega_{\varepsilon n1}, \omega_{\varepsilon n2}$ – частоты гармоник возмущающих сил от главного двигателя и гребного винта, Гц; K_i – коэффициенты запаса, назначаемые из требований исключения резонансных колебаний.

Обязательным условием обеспечения требований к вибрации является исключение резонансных колебаний корпуса и настойки по первому тону. При невозможности исключения резонансных колебаний, выполняются расчеты при другой длине цилиндрической вставки.

Выполняют расчеты, связанные с проверкой остойчивости и качки судна:
- уравнение остойчивости промыслового судна в соответствии с [10] имеет вид

$$h = 2B\sqrt{q_1 q_2} - z_g, \quad (51)$$

где h – начальная метацентрическая высота, м; q_1, q_2 – величины, связанные функциональной зависимостью с коэффициентами полноты, определяющими форму корпуса.

Ограничения при вариациях переменных величин накладываются на:

- мощность главного двигателя

$$N_{min} \leq N_{\partial} \leq N_{max}, \quad (52)$$

- диаметр гребного винта

$$D_{min} \leq D_{\varepsilon} \leq D_{max}. \quad (53)$$

При выборе главного двигателя накладывают ограничения на изменение его массы и размеров.

Оптимизация выполняется для каждого варианта корпуса судна, представленного множеством F . Определяются варианты корпуса, двигателя и движителя, удовлетворяющие требованию, исключения резонансных колебаний корпуса, которые составляют базу данных (выходные параметры оптимизации доминирующих подсистем).

Функциональные ограничения включают:

- требование к минимальной высоте надводного борта:

$$H - T \geq F^* m, \quad (54)$$

где H – высота борта судна; T – осадка в грузу; F^* – минимальная высота надводного борта судна, по требованиям классификационного общества.

- требование по грузоподъемности судна $P_{\partial p}^*$:

$$P_{\partial p} \geq P_{\partial p}^* t, \quad (55)$$

где $P_{\partial p}^*$ – заданная величина грузоподъемности по ТЗ

- требование остойчивости по нормированию нижнего предела начальной метацентрической высоты:

$$h \geq h^* m, \quad (58)$$

где h^* – критическое значение метацентрической высоты.

- требование по качке: расчетный период бортовой качки t должен быть больше чем критическое значение периода качки τ^* :

$$T \geq \tau^* c. \quad (59)$$

- требования обеспечения норм общей прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma_p \leq \sigma_n, \quad (60)$$

где σ_p – расчетные напряжения; σ_n – нормативные напряжения.

- требования обеспечения норм общей прочности по касательным напряжениям:

$$\tau_p \leq \tau_n, \quad (61)$$

где τ_p – расчетные напряжения; τ_n – нормативные напряжения.

- требование обеспечения норм прочности корпуса по предельному моменту:

$$|M_{np}| \geq k |M_p|, \quad (62)$$

где M_p – расчетный изгибающий момент при прогибе и перегибе, кНм; k – коэффициент запаса прочности по предельному моменту.

- требование обеспечения норм вибрации:

$$\omega_{эд} \in \lambda_i(\Omega_i); \omega_{с} \in \lambda_i(\Omega_i), \quad (63)$$

где $\omega_{эд}$ – частоты возмущающих сил от главного двигателя и винта, Гц; λ_i – частота собственных колебаний корпуса для i -го тона, Гц; Ω_i – области исключения резонансных режимов для i -го тона; $i = 1, 2, 3$ номер тонна.

В математической модели диапазон оптимизируемых переменных:

$$\begin{aligned} D_{min} \leq D \leq D_{max}; \delta_{min} \leq \delta \leq \delta_{max}; (v_s)_{min} \leq v_s \leq (v_s)_{max} \\ (L_w/H)_{min} \leq L_w/H \leq (L_w/H)_{max}; \\ 2,4 \leq B/T \leq 2,8, \end{aligned} \quad (64)$$

К ограничениям относятся:

$$L_{min} \leq L \leq L_{max}; T_{min} \leq T \leq T_{max};$$

$$(P_{сп})_{min} \leq P_{сп} \leq (P_{сп})_{max}; N_{min} \leq N \leq N_{max}. \quad (65)$$

- требование вместимости: расчет удельной вместимости грузового трюма μ должен быть больше чем требуемая удельная вместимость μ^* т.е.: $\mu \geq \mu^* \text{ м}^3/\text{т}$. (56)

- требование по ходкости (нижняя граница расчетной скорости)

$$v(x, x_a, x_k) \geq v_{min}, \quad (57)$$

Заключение

1. Разработан алгоритм определения характеристик и элементов модернизируемого траулера с учетом требований к технико-экономическим показателям;

2. Выбран и обоснован критерий для определения экономической эффективности рассматриваемых вариантов модернизации промышленного судна;

3. Разработана общая структура математической модели для обеспечения размерной модернизации судна, в состав которой также введены, ранее полученные математические модели

4. Разработана математическая модель для определения характеристик общей прочности корпуса при изменении длины модернизируемого судна;

5. Разработана математическая модель для определения частот собственных колебаний корпуса при изменении длины модернизируемого судна;

6. Разработана математическая модель оптимизации подсистем «корпус - главная энергетическая установка - движитель».

Литература

1. Александров В.Л. Борьба с вибрацией на судах / В.Л. Александров, А.П. Матлах, В.И. Поляков / Под общей редакцией В.Л. Александрова. - СПб.: Мор. Вест, 2005. - 424 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. - Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. - Т.1. Описание системы «Корабль». - 819 с.
3. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. - Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. - Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». - 812 с.
4. Гундобин А.А. Размерная модернизация и переоборудование судов / А.А. Гундобин, Г.Н. Финкель. - Л.: Судостроение, 1977. - 192 с
5. Дятченко С.В. Теоретические положения проектного обеспечения норм вибрации на судах промышленного флота / С.В. Дятченко. - Известия КГТУ, Калининград, 2012. - № 25. - С.119-126.
6. Дятченко С.В. Результаты исследования вибрационного состояния крупных и больших промысловых судов / С.В. Дятченко, С.В. Тананыкин. А.А. Королев – СПб, Мор Вест, 2008, №3 (27). – С. 111-115.
7. Дятченко С.В. Оценка параметров общей прочности и вибрации при размерной модернизации рыболовных судов / С.В. Дятченко, Н.С. Овсеев, С.В. Тананыкин. – СПб, Мор Вест, 2009, №4 (32). – С. 112-114.
8. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учебник / А.П. Иванов – Калининград: Изд-во БГАРФ, 210.- 275 с.
9. Патент RU№2433060 С1. Способ реконструкции судна / Овсеев Н.С., Дятченко С.В.
10. Маслюк Е.В. Проектирование морских судов. Расчеты нагрузки масс водоизмещения порожнем судов различного назначения / Е.В. Маслюк, А.Ф. Иконников – Калининград, Изд. ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2008. - 47 с.
11. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов.- Л.: Судостроение, 1981. - 376 с.

References

1. Alexandrov V.L. Combating Vibration on Vessels ,V.L. Aleksandrov, A.P. Matlakh, V.I. Polyakov, Under the general editorship of V.L. Alexandrova, St. Petersburg.Mor. West, 2005.424 p.
2. Gaykovich, A.I. Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons.Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.1., Description of the system "Ship", 819 p.
3. Gaikovich, AI Theory of design of displacement ships and ships, in 2 tons. Spb., Publishing House of Research Center MORINTEH, 2014, T.2., Analysis and synthesis of the "Ship" system, 812 p.
4. Gundobin A.A. Dimensional modernization and re-equipment of ships , A.A. Gundobin, G.N. Finkel. L .Shipbuilding, 1977, 192 p.
5. Dyatchenko S.V. Theoretical Provisions of Project Provision of Vibration Norms on Commercial Fleet Vessels.Proceedings of KGTU, Kaliningrad, 2012, № 25,p.p.119-126.

6. Dyatchenko S.V. Results of investigation of the vibrational state of large and large commercial vessels, S.V. Dyatchenko, S.V. Tananykin. A.A. Korolev, St. Petersburg, Mor. West, 2008, №3 (27),p.p. 111-115.

7. Dyatchenko S.V. Assessment of the parameters of overall strength and vibration in the dimensional modernization of fishing vessels,S.V. Dyatchenko, N.S. Ovseev, S.V. Tananykin, St. Petersburg, Mor West, 2009, №4 (32),. p.p.112-114.

8. Ivanov V.P. Technical and economic basis for the creation of fishing vessels: a textbook, Kaliningrad, Publishing House of the BGRF, 2010, 275 p.

8. Patent RU No. 2433060 C1. Method of ship reconstruction,Ovseev N.S, Dyatchenko S.V

10. Maslyuk E.V. Designing of sea-going ships.Calculations of the load of masses of displacement of empty vessels for various purposes, E.V. Maslyuk, A.F. Ikonnikov, Kaliningrad, Izd. FGBOU HPE "KSTU", 2008, 47 p..

11. RakovA.I. Design of fishing vessels,A.I. Rakov, N.B. Sevastyanov, L .Shipbuilding,1981, 376 p.

УДК 004.89

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУЗА БОРТОВОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА

Борис Самуилович Гуральник

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности мореплавания
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Иван Дмитриевич Евтушенко

курсант судоводительского факультета
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Сергей Сергеевич Подколзин

курсант судоводительского факультета
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодёжная, 6
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Аннотация

Существующие сегодня бортовые ИС помогают судоводителю при решении сложных задач поведения судна, относящиеся к блоку «Мореходность», «Прочность и вибрация», т.е. вопросов рассматриваемых в теории корабля и прочности судна.

В то же время есть большой круг вопросов, связанных с перевозимым на судне грузом, одним из которых является разжижение груза, которым обладают многие навалочные и насыпные грузы.

Процесс разжижения исследован недостаточно и поэтому деление грузов на разжижающиеся и не разжижающиеся, сегодня сделано на основе предыдущего опыта их перевозок и не имеет теоретического обоснования. Поэтому до настоящего времени случаются аварии при перевозке грузов, которые не должны были разжижаться.

В статье показано, что аварии с судами при перевозке данной категории грузов происходят вследствие ухудшения остойчивости из-за появления больших свободных поверхностей от разжижения груза, его смещения, инерционные силы от качки ускоряют этот процесс. В статье дан приближенный способ оценки отрицательного влияния разжижения на остойчивость судна.

Существующие международные и отечественные регламентирующие документы требуют, чтобы к погрузке не допускался груз, фактическая влажность которого превышает транспортный предел влажности. Однако, реализация этих требований на практике часто не возможна. Поэтому одним из путей исключения возможности аварий может быть установка системы датчиков в трюмах, фиксирующих влагосодержание в разных слоях груза. В случае разжижения также изменяются характеристики качки судна, что должно регистрироваться имеющимся измерительным блоком, анализироваться бортовой ИС «Мореходность», которая должна выдавать предупреждающие и корректирующие рекомендации судоводителю.

Ключевые слова: Бортовые интеллектуальные системы, грузы, опасности грузов, разжижение груза, влажность груза, аварии судов, свободные поверхности, потеря остойчивости.

TO THE QUESTION OF CARGO DILUTION CALCULATION NECESSITY BY THE BOARD INTELLIGENT SYSTEM FOR THE VESSEL SAFETY

Boris S. Guralnik

Ph. D., associate professor of department of navigation safety
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Ivan D. Evtushenko

Cadet of the navigational department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Sergey S. Podkolzin

Cadet of the navigational department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net

Abstract

The existing intelligent systems onboard help the navigator to solve complex problems of ship behavior related to the block "Seaworthiness", "Strength and Vibration", i.e. issues considered in ship theory and ship's strength.

At the same time, there is a wide range of issues related to the cargo carried onboard, one of which is the cargo dilution, which is property of bulk cargoes.

The process of dilution has not been studied enough and therefore the division of cargo into diluting and non-diluting is done on the basis of the previous experience of their transportation and has no theoretical basis. Therefore, up to now, accidents occur when transporting goods that were not the subject of dilution.

The article shows that accidents with vessels when transporting this category of goods occur due to the deterioration of stability due to the appearance of large free surfaces because of cargo dilution, its displacement, inertial forces from rolling accelerate this process. The article gives an approximate method of estimating the negative influence of dilution on the stability of the vessel.

Existing international and domestic regulatory documents require that cargo, the actual moisture content of which exceeds the transportable moisture limit is not allowed to load. However, the implementation of these requirements in practice is often impossible. Therefore, one of the ways to exclude the possibility of accidents can be the installation of a sensors system in holds that fix the moisture content in different layers of the cargo. In the case of dilution, the ship's rolling characteristics also change, which must be recorded by the existing measuring unit, analyzed by intelligent system "Seaworthiness", which should give warning and corrective recommendations to the navigator.

Keywords: Onboard intellectual systems, cargo, cargo dangers, cargo dilution, cargo moisture, ship accidents, free surfaces, loss of stability.

Разрабатываемые с 90-х годов судовые бортовые интеллектуальные системы (ИС) предназначены для оказания помощи администрации судов для обеспечения безопасности их эксплуатации. Многообразие задач, решаемых ИС определяет её архитектуру, которая включает блоки, оценивающие и описывающие динамику внешней среды, динамику объекта, в том числе в повреждённом состоянии, диагностические блоки, оценивающие различные показатели, характеризующие мореходность объекта [1].

Функционирование всех блоков базируется на базе знаний и частных моделях оценки устойчивости и бортовой качки, «захвата» судна волной (брочинга), слеминга, заливаемости, обледенения, присасывания на мелководье, динамики судна с затопленными отсеками и др.

В тоже время есть ряд задач, которые должны быть учтены в ИС и базе знаний. Необходимо дополнить ИС блоком и моделями, описывающими и анализирующими поведение грузов, состояние которых может изменяться во время рейса.

Разные виды грузов обладают различными опасностями. Например, перевозки некоторых режимных грузов требуют правильную

организацию их вентилирования, чтобы исключить подмочку и снижение их качества.

Среди навалочных и насыпных есть грузы, склонные к разжижению (группа А по кодексу IMSBC), обладающие химическими и другими опасностями (грузы группы В по кодексу IMSBC) и грузы группы С, которые не обладают химическими и другими опасностями.

В [2] описано более 20 аварий в период 1933-1971 г. с судами, на которых произошло разжижение груза в условиях значительного и сильного волнения. Во всех этих авариях наблюдалось появление начального крена $4-12^\circ$, который монотонно возрастал до $20-25^\circ$, а затем до $45-90^\circ$, несмотря на попытки его выравнивания приёмом балласта и изменением курса и скорости, путём удаления свободной воды с его поверхности. Для некоторых аварийных судов отмечалось, что количество груза в состоянии разжижения составляло от 50 – 70 сантиметров верхнего слоя в глубину, до одной трети или сорока процентов груза в грузовом помещении.

Главной причиной разжижения является повышенная влажность загруженного на судно груза. Как правило, вследствие судовой вибрации и качки судна влага скапливается в верхнем слое

штабеля, а в некоторых случаях выступает тонким слоем на поверхности груза. Свободная вода и водонасыщенный, пульпообразный верхний слой штабеля начинает свободно перетекать с борта на борт, т.е. ведёт себя, как жидкий груз и вызывает начальный крен $4-12^\circ$. Появление подвижного верхнего слоя в штабеле груза уменьшает остойчивость судна, что способствует увеличению крена. Если при этом судно испытывает качку с амплитудами, превышающими угол естественного откоса груза, то происходит обрушение некоторой части штабеля, вызывающее крен 40 и более градусов и в конечном итоге опрокидывание судна.

На основе анализа аварийных случаев был разработан Международный Кодекс перевозки незерновых навалочных грузов 1965 г, а затем 1979 г, который после ряда переработок и уточнений действует до настоящего времени. Применение Кодекса позволило снизить аварийность судов вследствие разжижения груза, однако начиная с 2010 г. зафиксированы ряд аварий, во время которых опрокинулись после разжижения груза шесть крупных судов. И если в авариях, связанных с разжижения груза в 70-х годах участвовали суда длиной 100-145 метров и дедвейтом 7 – 12 тысяч тонн, то аварии 2010 – 2015 г. случились с судами дедвейтом по 50 -80 тысяч тонн [3], [4], т.е имеющих в 1,5 – 2 раза большие размеры. Четыре из погибших судов перевозили никелевую руду из портов Индонезии и Филиппин в период муссонных дождей. Никелевая руда включена в перечень разжижающихся грузов (группа А) Кодекса IMSBC, однако, в 2015 г. также погибли два судна, перевозящие бокситы, которые в Кодексе IMSBC отнесены к грузу группы С, как не разжижающиеся и не обладающие химическими и другими опасностями.?

Данные аварии свидетельствуют о том, что есть факторы или свойства груза в трюме, вызывающие его непредсказуемое поведение.



Рис. 1 Определение угла естественного откоса

На наш взгляд, новый всплеск аварийности с судами, перевозящими навалочные грузы, связан с одной стороны с влиянием свободных поверхностей груза после его разжижения и качкой судна, а с другой недостаточным знанием свойств груза, а также технологическими и организационными причинами, влияние которых трудно представить в формализованном виде.

Специалисты считают, что подвержены разжижению мелкодисперсные грузы, размеры частичек которых менее 7 мм и поведение которых в трюме требует дополнительного исследования.

На кафедре «Безопасности мореплавания» БГАРФ был поставлен эксперимент с морским песком с размерами частичек менее 0,7 мм.



Рис. 2 Загруженный отсек перед наклоном

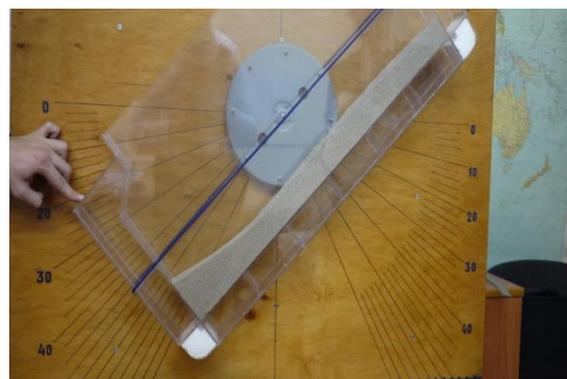


Рис. 3 Угол смещения груза при малой загрузке отсека

Образец груза был отобран в летнее время, выдержан в сухом помещении в течение одного месяца. Угол естественного откоса, определённый оперативным методом по методике Кодекса IMSBC оказался 32° (см. рис. 1).

Образцы груза помещались в наклоняемый макет отсека балкера, в котором варьировались разные уровни загрузки. Далее отсек очень медленно и плавно наклонялся для определения угла и формы поверхности смещения, как показано на рис.2 и 3. Опыты показали, что при малой загрузке отсека наблюдается смещение верхнего тонкого поверхностного слоя груза при угле наклона отсека на 45° . При загрузке отсека наполовину, смещение наблюдается при угле наклона отсека 48° , а для полного отсека, смещение не наблюдалось при угле наклона отсека более 64° , т.е при углах вдвое превышающих угол естественного откоса

Данное обстоятельство свидетельствует о том, что помимо влияния свободных поверхностей груза после его разжижения, качки судна на возможность смещения оказывают влияние и внутренние свойства и поведение груза в трюме, которые на сегодняшний день

исследованы недостаточно. Подтверждением этого являются аварии с судами, перевозящими бокситы, разжижение которых по Кодексу IMSBC не должно было произойти.

Влияние свободных поверхностей приближенно можно оценить следующим образом.

Рассмотрим судно, дедвейтом около 14 тысяч тонн, имеющее 5 трюмов, загруженных равномерно гипотетическим навалочным грузом с удельным погрузочным объемом около 0,74 м³/т. Большие трюмы № 3 и 4 прямоугольные в плане, трюмы № 1, 2 и 5 имеют форму трапеции. Диаграмма статической остойчивости судна с грузом приведена на рис. 4. В случае разжижения груза свободные поверхности в каждом трюме приведут к уменьшению плеч диаграммы статической остойчивости.

Поправки к плечам диаграммы статической остойчивости, при некоторых допущениях, вычислены по способу М.А. Губина по формулам [5]:

$$\begin{aligned} \delta l_{\theta} &= \Delta M_{\theta} / M, \\ \Delta M_{\theta} &= \rho_{гр} * I_{O} * f(\theta), \\ I_{O} &= l * b^3 * k, \end{aligned}$$

$$k = (1 + (b_1/b) + (b_1/b)^2 + (b_1/b)^3) / 48,$$

где: δl_{θ} – поправки к плечам диаграммы статической остойчивости от свободных поверхностей в трюмах при углах θ ;

ΔM_{θ} – кренящие моменты от переливания разжиженного груза при углах θ ;

M – водоизмещение судна, в рассматриваемом состоянии нагрузки;

I_{O} – момент инерции площади свободной поверхности в трюме при прямом положении судна;

l – длина трюма;

k – коэффициент, учитывающий форму свободной поверхности трюма;

b_1, b – соответственно наименьшая и наибольшая ширина трюма;

$f(\theta)$ – коэффициенты, зависящие от отношения высоты штабеля груза к ширине трюма при углах θ .

Для трюмов трапецевидной в плане формы коэффициенты $f(\theta)$ условно приняты как для отсеков в форме параллелепипеда с шириной, равной средней линии трапеции.

В таблице 1 приведены поправки на свободные поверхности к диаграмме статической остойчивости, вычисленные по данным формулам для всех пяти трюмов судна, а на рис. 4 диаграммы статической остойчивости при разжижении груза в двух больших трюмах.

Ожидается, что в больших трюмах № 3 и 4 эти поправки оказались наибольшими. Разжижение груза в этих двух отсеках приводит к ухудшению, как начальной, так и остойчивости на больших углах крена, как показано на рис. 4.

Попытки спрямить судно, имеющее такую диаграмму статической остойчивости, путём перекачки балласта, может ещё больше усугубить ситуацию. При наступлении разжижения не действует положение, что чем больше судно, тем оно безопаснее в отношении потери остойчивости.

Таблица 1

Поправки к плечам диаграммы статической остойчивости δl_{θ}

№ трюма	θ							
	10	20	30	40	50	60	70	80
1-й трюм	0,010	0,021	0,034	0,041	0,043	0,042	0,038	0,033
2-й трюм	0,076	0,128	0,177	0,177	0,173	0,156	0,131	0,101
3-й трюм	0,180	0,321	0,392	0,392	0,380	0,340	0,270	0,213
4-й трюм	0,180	0,321	0,392	0,392	0,380	0,340	0,270	0,213
5-й трюм	0,006	0,013	0,021	0,030	0,036	0,034	0,033	0,033

Если афинно преобразовать наше судно, увеличив его в «n» раз, таким образом, что его дедвейт составит около 54000 тонн, то значения плеч диаграммы статической остойчивости тоже увеличатся «n» раз. Одновременно в «n» раз, как это следует из формулы для δl_{θ} , также увеличатся поправки, учитывающие отрицательное влияние свободных поверхностей от разжижения груза и у «большого» судна тоже появится начальный крен из-за отрицательной начальной остойчивости, как и у исходного судна.

Таким образом, в случае разжижения груза в трюмах, возможна потеря остойчивости не только на судах дедвейтной группы около 14000 тонн, но и на судах с размерами «Panamax», «Capesize» и ещё больших судах. Согласно

Кодексу IMSBC грузоотправитель должен до начала погрузки передать на судно «Сертификат о характеристиках груза на момент погрузки», в котором помимо других характеристик, для разжижающихся грузов приводится фактическая влажность и транспортабельный предел влажности (TML). TML должен определяться в сертифицированной лаборатории по методике Кодекса IMSBC с использованием проб груза, отобранных по одобренной Кодексом IMSBC методике. Проба груза для определения влажности груза, согласно Кодекса IMSBC, должна быть отобрана не ранее, чем за 72 часа до начала погрузки груза. Если на причале лежит штабель груза 50 – 150 тысяч тонн, то для обеспечения репрезентативности пробы,

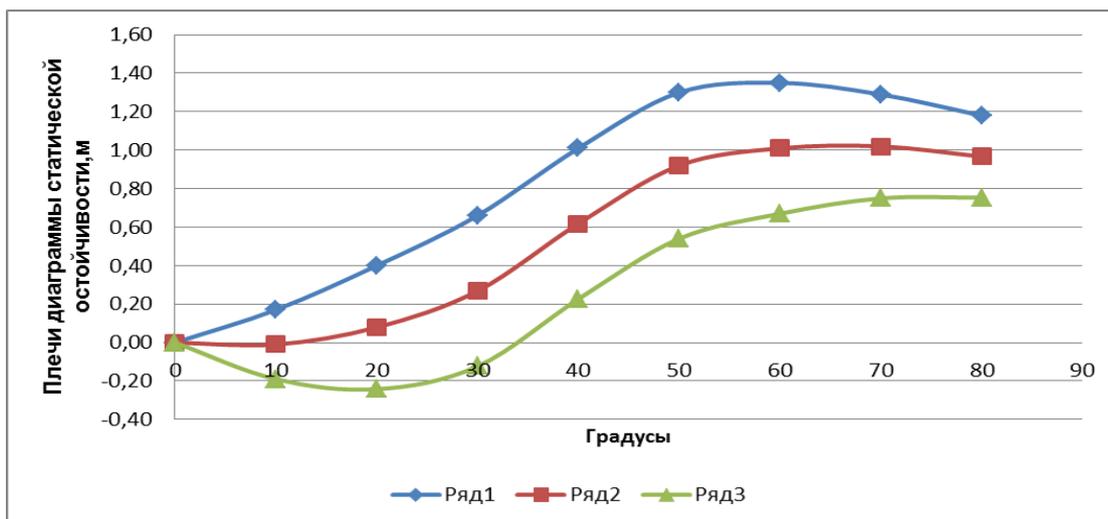


Рис. 4 Диаграммы статической остойчивости загруженного судна и после разжижения груза в одном и двух трюмах

Ряд 1 – исходная диаграмма; Ряд 2 - после разжижения груза в одном трюме; Ряд 3 - после разжижения груза в двух трюмах.

из него должно быть отобрано заданное количество точечных проб с разных уровней штабеля, что технически практически не осуществимо. В результате на судно из разных частей штабеля может грузиться груз, имеющий разную влажность.

В портах Филиппин, Индии, Индонезии, из-за ограниченных технологических возможностей, погрузка судов производится на рейде с барж и загрузка судов типа «Panamax» растягивается на 20 – 30 суток. За это время возможна подмочка груза осадками, которые в муссонный период бывают очень интенсивными.

В результате в разные районы трюмов может попасть груз, имеющий разную, в том числе и повышенную влажность, что способствует его разжижению и смещению.

С 1 января 2017 г. ИМО ввёл для разжижающихся грузов корректировки к Кодексу IMSBC, в которых устанавливаются требования к отбору проб, методам их тестирования и контролю содержания влаги в процессе загрузки судна. Однако, на наш взгляд, данные корректировки не снимают названные проблемы.

В данной статье рассматриваются только некоторые вопросы, которые необходимо учесть

при проектировании блока ИС, помогающего администрации судна принимать решения, при перевозке некоторых навалочных грузов.

Оценка ухудшения остойчивости в случае разжижения груза в одном, двух и более трюмах судна в ИС может быть приближенно сделана с помощью алгоритма, описанного в данной статье. Судно с грузом в состоянии разжижения может иметь положительную и отрицательную начальную остойчивость, и соответственно характеристики его качки будут отличаться, что регистрируется имеющимся измерительным блоком, анализируется бортовой ИС «Мореходность», которая должна выдавать предупреждающие и корректирующие рекомендации судоводителю.

Сегодня нет готовых решений, описывающих процесс разжижения груза в трюме. Поэтому также одним из путей исключения возможности аварий может быть установка системы датчиков в трюмах, фиксирующих влагосодержание в разных слоях груза и регистрирующего устройства ИС, анализирующей его изменение во время рейса.

Литература

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / По ред. Ю.И.Нечаева. СПб: Изд.центр СПбГМТУ, 2001. 365 с.
2. Аксютин Л.Р., Благовещенский С.Н. Аварии судов от потери остойчивости. Л.: Судостроение, 1975.- 197 с.
3. Circular P&I Club Gard № 23/2010, January 2011.
4. Unsafe cargo, unsafe anchorage, lost ship. Mars Report 277, Seaway, November 2015. P. 17.
5. Благовещенский С.Н, Холодидин А.Н. Справочник по теории корабля. В двух томах. Том.1. Статика корабля. Л.: Судостроение, 1975.-336.

References

1. Aleksandrov V.L., Matlah A.P., Nechaev Y.I., Polyakov V.I., Rostovcev D.M. Intellektualnie sistemi v morskikh issledovaniyah i technologiyah / pod red. Y.I.Nechaeva. SPb.Izd.centri SPbGMTU, 2001.365 p.
2. Aksutin L.R., Blagoveshenskii S.N. Avarii ot poteri ostoichivosti. L, Sudostroenie, 1975. 197 p.
3. Circular P&I Club Gard № 23/2010, January 2011.
4. Unsafe cargo, unsafe anchorage, lost ship. MARS Report №. 277, Seaway, November 2015. P.17.
5. Blagoveshenskii S.N., Cholodilin A.N. Spravochnik po teorii korablya. V dvuch tomach. Tom 1. Statika korablya. L, 1975.336 p.

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

УДК: 621.74:681.3

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К КОРРОЗИИ СУДОВЫХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ****Валерий Иванович Веревкин**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и метрологии
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: verevkinvi@mail.ru

Валерий Федорович Игушев

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии материалов и метрологии
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: Igushev_TMM@bga.gazinter.net

Светлана Александровна Терюшева

кандидат химических наук, доцент кафедры физики и химии
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: sterjusheva@mail.ru

Аннотация

Особенностью защиты судовых металлоконструкций от ЭЖК является то обстоятельство, что активному разрушению подвергается не вся конструкция, а лишь локальные зоны сварных соединений. Для таких зон традиционные методы защиты, такие как анодная и катодная, оказываются малоприменимыми. Предложено повышать стойкость к коррозии судовых металлоконструкций путем регламентирования химического состава свариваемых деталей и узлов, а также состава сварочных материалов таким образом, чтобы разность химического состава по границам каждого сварного шва была минимальной. Показано, что особо опасным является наличие по границам шва значительного градиента по кремнию. Доказано, что наибольшая ТЭДС возникает при минимальном значении содержания кремния в одном из компонентов сварного соединения, например, в шве. Объяснен механизм электрохимической коррозии сварного шва и околошовной зоны, а также механизм зарождения в сварном соединении локальных очагов электрохимической коррозии. Даны рекомендации по снижению опасности возникновения локальных очагов коррозии. Приведены методика и результаты расчета уровня гомогенизации стали на определяющей стадии ее производства.

Ключевые слова: судовая металлоконструкция, сварные соединения, сварной шов, околошовная зона, электрохимическая коррозия, термopара, термоэлектродвижущая сила, кремний, электропотенциал, локальные очаги коррозии, корректирующие добавки, неметаллические включения, гомогенизация стали.

IMPROVING CORROSION RESISTANCE OF SHIP STRUCTURES**Valery I. Verevkin**

Dr.Sci.Tech., professor, professor of materials technology and metrology department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: verevkinvi@mail.ru

Valery F. Igushev

PhD, associate professor, head of materials technology and metrology department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: Igushev_TMM@bga.gazinter.net

Svetlana A. Terusheva

PhD, associate professor of physics and chemistry department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: sterjusheva@mail.ru

Abstract

When protecting marine structures from galvanic corrosion some peculiarities are to be taken into consideration such as the fact that not all of the structure but only local zones of welded joints are subjected to active destruction. For these zones traditional protection methods such as anodic and cathodic are proved to be hardly suitable. It is proposed to increase the corrosion resistance of ship metal structures by regulating the chemical composition of the welded parts and assemblies, as well as the composition of the welding materials in such a way that the difference in chemical composition along the boundaries of each weld is minimal. It is shown that the presence of a significant silicon gradient along the boundaries is particularly dangerous. It is proved that the largest thermal emf occurs with the minimum value of the silicon content in one of the components of the welded joint, for example, in a seam. The mechanism of electrochemical corrosion of the welded seam and the weld zone has been explained, as well as the mechanism of initiation of local concentrated cell corrosion in the welded joint. Recommendations are given to reduce the risk of concentrated cell corrosion. There is presented the method and results of calculating the level of homogenization of steel at the determining stage of its production.

Keywords: marine steel structure, welded joint, weld heat-affected zone, electrochemical corrosion, thermocouple, thermoelectric power, silicon, potential, concentrated cell corrosion, corrective additives, non-metallic inclusions, homogenization of steel.

Введение

Коррозия подвергает значительным разрушениям оболочковые обшивки морских судов, стойки, стенки, переборки и различные судовые технические средства. Наиболее агрессивной является электрохимическая коррозия (ЭХК). Поскольку материалы деталей и сварных швов, как правило, отличаются друг от друга, то между ними возникают термопары. При наличии разности температур между концами такой термопары (например, внешней и внутренней сторонами обшивки судна) возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), многократно ускоряющая процесс коррозии. Особенностью защиты судовых металлоконструкций от ЭХК является то обстоятельство, что активному разрушению подвергается не вся конструкция, а лишь локальные зоны сварных соединений

Одним из положительно зарекомендовавших себя направлений снижения склонности сварных металлоконструкций к электрохимической коррозии является понижение градиента концентраций элементов по границам сварных швов.

Особого внимания при разработке мер защиты сварных соединений металлоконструкций от ЭХК требуют выявленные свойства кремнийсодержащих сталей: количество кремния в сталях оказывает наибольшее влияние на электрический потенциал стали [1]. Кроме того найдено, что при снижении содержания кремния в сталях ниже 0,25 % их электрический потенциал резко возрастает, особенно при нагревании рабочего спая образованной по границе сварного шва термопары [2]. Требуется разработать технологические меры повышения стойкости судовых металлоконструкций к ЭХК, учитывающие эти обстоятельства.

1. Пути повышения стойкости к электрохимической коррозии судовых металлоконструкций

Для изучения обстоятельств, связанных с коррозией сварных соединений были

изготовлены термопары, образованные двумя электродами: одним – из испытуемой стали, другим – из свинца, имеющего приблизительно нулевой электрический потенциал.

Наши измерения показывают, что феррит с небольшими добавками кремния (до 0,02 %) при отсутствии нагрева рабочего спая образованной термопары относительно свободных концов $\Delta t = 0$ °С имеют небольшой положительный потенциал (при этом разность потенциалов термопары составляет +7 мкВ), резко возрастающий до +190 мкВ при $\Delta t = 20$ °С и, наконец, до +1010 мкВ при $\Delta t = 78$ °С. В то же время высококремнистые стали (с содержанием кремния 0,9-0,95 %) при $\Delta t = 0$ °С обеспечивают небольшой отрицательный потенциал в -13 мкВ при $\Delta t = 0$ °С, меняющий знак до +26 мкВ при $\Delta t = 20$ °С и достигающий только +60 мкВ при $\Delta t = 78$ °С.

При ощутимой разности потенциалов в 20 мкВ между ферритом с малым содержанием кремния и высококремнистой сталью в образованной ими термопаре уже при $\Delta t = 0$ °С создается значительный ток. Его росту в сварном соединении способствуют две причины: малые размеры зоны электрохимических взаимодействий материалов сварного соединения и высокая электропроводность образующихся электрических цепей. Учитывая хорошую проводимость морской воды, разрушительное действие электрохимической коррозии на сварные соединения оказываются экстремально большим. При средней разности потенциалов между внутренней и внешней сторонами обшивки судна в 20 °С разность потенциалов возрастает до 130 мкВ, т.е., в 6,5 раз!

Анализ разрушений незащищенных сварных соединений обшивки судов показывает, что наибольшей электрохимической коррозии, как правило, подвергается переходная зона между сварным швом и околосшовной зоной.

Равнопрочность сварного шва и основного металла является одним из главных требований

проектирования надежного и прочного сварного соединения. Поскольку коэффициенты перехода сварочных материалов в сварной шов зависят от большого числа факторов, то для гарантии обеспечения подобающей основному металлу прочности сварного шва зачастую степень легирования последнего обеспечивают выше, чем в основном металле. Так при механизированной сварке в качестве материала сварочного электрода часто используют проволоку Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70, содержащую: С – 0,05-0,11 %, Si – 0,70-0,95 %, Mn – 1,80-2,10 %, Cr < 0,20 %, Ni < 0,025 %. Высокий кремний и марганец в сварочной проволоке связан, прежде всего, с необходимостью раскисления металла шва.

Приблизительно содержание $c_{ш}$ элемента в металле сварного шва может быть найдено по правилу смешения через известную долю θ основного металла в шве:

$$c_{ш} = c_0 \theta + c_3 (1 - \theta), \quad (1)$$

где c_0 , c_3 – исходное содержание элемента в основном и электродном металле.

Доля основного металла в металле шва зависит от конструкции соединения, способа, режима сварки и др. причин. При сварке покрытыми электродами θ лежит в пределах от 0,15 до 0,5. При сварке в CO_2 на обратной полярности θ по кремнию равен 0,23. В случае сварки под флюсом θ меняется от 0,25 до 0,7.

Так при сварке в CO_2 на обратной полярности широко распространенной низкоуглеродистой конструкционной стали ВстЗсп, по ГОСТ 380-71, содержащей: С – 0,14-0,22 %, Si – 0,12-0,3 %, Mn – 0,4-0,65 %, Ni < 0,3 %, Cr < 0,3 %, содержание кремния в сварном шве будет лежать в пределах от 0,57 до 0,80 %. При этом потенциал сварного шва оказывается менее положительным, чем потенциал основного металла. Иначе говоря, на границе «сварной шов-околошовная зона (ОШЗ)» будет приложено напряжение: минус – ко шву, плюс – к ОШЗ. Экспериментально доказано, что в таком случае вблизи этой границы значительно разрушается находящийся под отрицательным потенциалом сварной шов. Поскольку сварной шов соединяет детали между собой, то подобных границ с ОШЗ, как минимум, будет две.

С другой стороны, если потенциал шва будет менее легирован кремнием, чем материалы деталей, то он оказывается более положительным по отношению к ОШЗ. В этом случае минус прикладывается к деталям, плюс – ко шву. И интенсивному разрушению подвержены материалы деталей.

Так замечено, что при определенных условиях усиленный износ металла ОШЗ при коррозии сварных соединений корпусов морских судов начал наблюдаться с тех пор, как их корпуса стали изготавливать из стали 09Г2 [3]. По ГОСТ 19282-73 эта сталь содержит: С – 0,12 %, Mn – 1,4-1,8 % и Si – 0,17-0,37 %. При автоматической дуговой сварке под флюсом этих сталей обычно используют сварочную проволоку Св-08ГА и низкокремнистый слабоокислительный плавный флюс АН-22. Сварочная проволока содержит: С – до 0,1 %, Si – до 0,06 %, Mn – 0,8-1,1 %, Ni – до 0,25 %, Cr – до 0,1 %. Флюс АН-22 по ГОСТ 9087-81 содержит: MnO – 7-9 %, CaF_2 – 20-24 %, Al_2O_3 – 19-23 %, SiO_2 – 18-22 %, CaO – 12-15 %, MgO – 12-17 %.

По нашим измерениям при средней разности температур между внутренней и внешней сторонами обшивки судна в 20 °С потенциал материала сварочной проволоки Св-08ГА составляет: 200 мкВ при содержании кремния 0,02 % и 175 мкВ при содержании кремния 0,06 %, соответственно. В тоже время потенциал стали 09Г2 при той же разности температур в 20 °С и содержании кремния 0,17 % оказался равным 107 мкВ, при 0,25 % – 40 мкВ, а при 0,37 % – 24 мкВ. Таким образом, при любом допустимом по ГОСТ соотношении содержания кремния в сварочной проволоке и основном металле положительный потенциал проволоки значительно превышает положительный потенциал материала деталей. Иначе говоря, к границе «сварной шов – ОШЗ» прикладывается разность потенциалов: плюс – ко шву, минус – к ОШЗ, которая и подвергается разрушению.

Таким образом, при организации защиты от электрохимической коррозии сварных соединений обшивок морских судов следует учитывать соотношение и абсолютные значения электрических потенциалов, образующихся на границах сварных швов. В работе [1] на регрессионной метамоде показано, что при этом порядка 65% потенциала формируется за счет влияния кремния, 22% – углерода и около 12 % – алюминия. Однако для более полной оценки результирующего напряжения на границе сварного шва требуется учет не только распределения кремния между швом и ОШЗ, но и содержания в них других раскислителей, прежде всего углерода и алюминия.

2. Механизм зарождения в сварном соединении локальных очагов электрохимической коррозии

ЭХК сварных соединений под действием термоэлектродвижущих сил (ТЭДС) усугубляется наличием в зоне сварки других видов коррозии. Так питтинговая коррозия возникает в морской

воде и генерируемые при этом электрические напряжения в месте поражения оказываются сопоставимыми с теми, что возникают под действием ТЭДС. Термин «питтинг» обычно используют применительно к глубоким точечным поражениям. Наличие питтинга в сварном соединении приводит к росту суммарного напряжения по границе сварного шва и стимулирует разрушение приграничной зоны.

Основной причиной возникновения питтингов является дефектность (неоднородность) структуры реальных металлических материалов.

Неметаллические включения в приповерхностном слое стальной детали появляются в ходе всего металлургического передела. Наибольший вклад в их образование вносит стадия выплавки и внепечной обработки стали. Так нерегламентированно проведенная операция корректировки химического состава и раскисления стали может явиться причиной недостаточной изоморфности разливаемой жидкой стали. В конечном счете это может привести к неполному усвоению, растворению вносимых корректирующих присадок. В результате на поверхности деталей возникают питтинги, а в зонах сварных соединений активизируются локальные очаги электрохимической коррозии.

Традиционными раскислителями сталей являются: кремний, марганец и алюминий. Причем кремний, являющийся основным источником термоэлектродвижущей силы в сварных соединениях, используется как основной, а алюминий – как тонкий раскислитель.

Процессу выведения неметаллических включений из стали в процессе раскисления способствует укрупнение (коалесценция) жидких частиц этих включений. Преимущества получения жидких, а не твердых неметаллических включений отвергает раскисление стали одним раскислителем. В последнем случае при раскислении одним кремнием образуется почти чистый оксид SiO_2 с высокой температурой плавления 1710°C , одним марганцем – MnO (1610°C) и одним алюминием – Al_2O_3 (2050°C). Процесс завершается поздно, в основном – в изложнице при низкой температуре 1530°C , образуя плохо удаляемые твердые продукты раскисления. Поэтому целесообразно раскислять сталь комплексными раскислителями, в которых содержится несколько элементов с высоким сродством к кислороду [5]. Соотношения концентраций элементов должны обеспечить получение жидких продуктов раскисления с температурой плавления гарантированно ниже

температуры плавления стали. Такими легкоплавкими соединениями являются силикаты $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ с температурой плавления 1324°C и алюмосиликаты $2\text{MnO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ (1168°C). Поэтому для снижения объема неметаллических силикатных и алюмосиликатных включений в готовых стальных изделиях используют комплексные раскислители: кремний + марганец + алюминий.

Опыт отечественных предприятий показывает, что по ходу выплавки стали приходится корректировать получаемый химический состав на 25-30 % плавок углеродистой стали и на 35-70 % низколегированной. Особые требования предъявляются к изоморфности жидкого металла высокоответственных сталей. Так допускается корректировка состава металла по углероду присадкой в печь чугуна не более, чем на 0,05 %, причем не позднее, чем за 5 минут до выпуска. Допускается также корректировка углерода в стали на выпуске сухими коксовыми отсевами или электродной крошкой до 0,03 % углерода. Нарушение этих правил (прежде всего, превышение допустимого расхода углеродосодержащих добавок и снижение длительности гомогенизации обработанного расплава) приводит к неполному усвоению углерода жидкой сталью, и возникновению нерастворенных образований углерода.

В целом время, необходимое для полного усвоения (расплавления, равномерного распределения и растворения) вводимых корректирующих материалов зависит от температуры плавления, размеров загружаемых кусков, температуры стали и интенсивности перемешивания. Так с применением подогрева при внепечной обработке стали достигается более быстрое (5-15 мин.) и полное усвоение добавок.

3. Предупреждение неметаллических включений стали при введении в нее кремния

При всем преимуществе раскисления и легирования стали комплексными раскислителями, многие металлургические предприятия из-за высокой стоимости последних предпочитают прежнюю технологию использования трех видов раскислителей: кремнийсодержащих + марганецсодержащих + алюминия. Поскольку неизоморфность стали по кремнию оказывает наибольшее электрохимическое влияние на образование локальных очагов электрохимической коррозии сварных соединений, то при условии соблюдения требований по порционности, длительности

введения и температуры расплава наибольший интерес представляет собой задача его оперативной гомогенизации.

Одной из принципиальных особенностей переноса кремния при современном осаждающем раскислении и легировании порошковым ферросилицием, вводимым в ковш со сталью через погружную футерованную фурму, является то, что весь кремний в течение короткого времени поступает непосредственно в металл. Он подхватывается потоком расплава и разносится по объёму ковша.

Однако именно поскольку вновь введённый кремний сразу попадает в металл, неоднородность по содержанию кремния в стали на момент окончания продувки порошком оказывается большой. Потоками жидкости насыщенные кремнием объёмы затягиваются в нижнюю часть ковша с меньшей интенсивностью гидротоков, приводя к высокой неоднородности этой зоны. В то же время верхние объёмы металла в условиях интенсивного перемешивания гомогенизируются значительно быстрее.

Вызывает интерес оценка малоизученного вопроса о лимитировании по времени операций выравнивания температуры стали, либо ее химической неоднородности. Натурные и натурно-модельные исследования проводились с участием авторов работы на ОАО «ЕВРАЗХОЛДИНГ».

При описании теплообмена в расплаве в условиях его вынужденного движения, вызываемого подачей газа через погружную фурму, решается система дифференциальных уравнений в частных производных. Исследуемая среда считается в принятом приближении несжимаемой, а её характеристики – постоянными и не зависящими от температуры.

В приближении Буссинеска система уравнений конвективного теплообмена может быть представлена в следующем виде [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{g}_p}{\partial t_p} + (\bar{g}_p \nabla) \bar{g}_p &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{g}_p, \\ \operatorname{div} \bar{g}_p &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t_p} + \bar{g}_p \nabla T &= a \nabla^2 T, \\ \frac{\partial C_p}{\partial t_p} + \bar{g}_p \nabla C_p &= D \nabla^2 C_p + F^c, \end{aligned} \quad (2)$$

где \bar{g}_p – вектор скорости движения расплава; t_p – время; T – температура расплава;

C_p – концентрация элемента (кремния); D – коэффициент диффузии элемента; F^c – источниковый член; a – коэффициент температуропроводности расплава; ν – кинематический коэффициент вязкости расплава; ∇ – оператор Гамильтона; ∇^2 – оператор Лапласа; ρ – плотность расплава; P – давление в расплаве.

Уравнения (2) записаны в размерной форме. Для перехода к удобному для вычислений безразмерному виду, приняты масштабы: m_t – времени; m_x – расстояния; m_v – скорости; m_T – температуры; m_c – масштаб концентрации.

С помощью соотношений

$$\begin{aligned} t_p &= m_t \cdot t; \\ \bar{x}_p &= m_x \cdot \bar{x}; \\ \bar{g}_p &= m_g \cdot \bar{g}; \\ T &= m_T \cdot \Theta + T_{\min}; \\ C_p &= m_c \cdot C \end{aligned} \quad (3)$$

введены безразмерные переменные t , \bar{X} , \bar{g} , Θ , C .

После подстановки (3) в (2) и последующей группировки для случая $S_h = 1$, где $S_h = \frac{m_x}{m_g \cdot m_t}$ – число Струхала, система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{g}}{\partial t} + (\bar{g} \nabla) \bar{g} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P' + \frac{1}{\operatorname{Re}} \nabla^2 \bar{g}, \\ \operatorname{div} \bar{g} &= 0, \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \bar{g} \nabla \Theta &= \frac{1}{\operatorname{Re} \cdot \operatorname{Pr}} \nabla^2 \Theta, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{g} \nabla C &= \frac{1}{\operatorname{Re} \operatorname{Sc}} \nabla^2 C + \tilde{F}^c \end{aligned} \quad (4)$$

где $\operatorname{Re} = \frac{m_g m_x}{\nu}$ – число Рейнольдса;

$\operatorname{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – Прандтля;

$P' = \frac{m_x}{m_v} P$ – безразмерное давление;

\tilde{F}^c – безразмерный источниковый член концентрации;

$$Sc = \frac{V}{D} - \text{число Шмидта.}$$

Уравнения (4) записаны в безразмерном виде в цилиндрической системе координат. Предполагается, что краевые условия задачи соответствуют аксиальной симметрии температуры, скорости и давления и исключают азимутальное движение расплава. Уравнения (4) записываются в дивергентном представлении (в виде Θ - ψ - ω -системы), и далее аппроксимируются с помощью монотонной консервативной разностной схемы, которая дополняется краевыми условиями для каждой искомой переменной.

Продувка осуществлялась в 130-тонных ковшах на установке продувки стали азотом. Учитывая аксиальную симметрию ковша со сталью, продувочная фурма располагалась по оси симметрии ковша. Тонкий порошок ферросилиция подавали через продувочную фурму методом псевдооживления. Расход порошка 40-90 кг/мин. Расход азота на продувку, подаваемого через ту же фурму 35-50 м³/ч. Коэффициент усвоения кремния 0,7. В качестве начального значения концентрации кремния в стали в ковше принято $[Si]_{исх} = 0,15 \%$, что согласно ГОСТ 380-88 соответствует минимально допустимому содержанию кремния в сталях Ст 1сп-Ст 5сп.

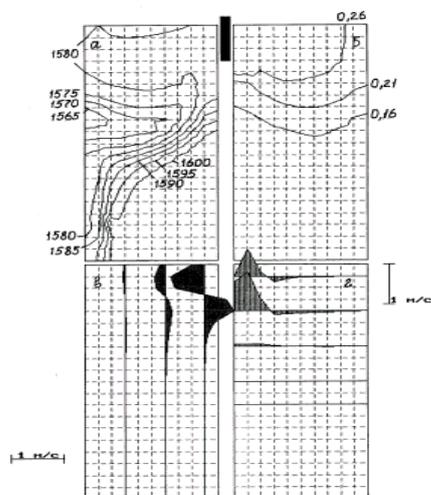


Рис. 1. Распределение температуры (а) °С, концентрации кремния (б) %, скорости движения расплава в ковше со сталью по оси R (в) и оси Z (г) м/с при $[Si]_{исх} = 0,15 \%$, $H_M = 0,5 \text{ м}$, $Q_{пор} = 40 \text{ кг/мин}$, $Q_{N2} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, $t = 2 \text{ мин}$

Аппроксимированную систему уравнений конвективного теплообмена решали итерационным методом Гаусса-Зейделя в сочетании с последовательной верхней релаксацией, при решении использовали продольно - поперечную прогонку.

На рис. 1 представлены результаты математического моделирования теплообмена в расплаве ковша при продувке стали порошком ферросилиция в течение 2 мин с расходом порошка 40 кг/мин и

глубине погружения фурмы $H_M = 0,5 \text{ м}$. Исходное содержание кремния в стали $[Si]_{исх} = 0,15 \%$. Расход азота поддерживался на уровне 40 м³/ч.

Как видно из рис. 1б, исходная для продувки чистым азотом неоднородность стали по кремнию составляет более 0,10 %. Разброс по температуре составляет 30 °С. Точность экспресс-анализа в этом диапазоне содержания кремния в стали составляет $\epsilon_{a\%}^{Si} = 0,015 \%$.

Для рядовых спокойных марок стали Ст 1сп-Ст 5сп согласно ГОСТ 380-88 содержание кремния должно укладываться в диапазон 0,15-0,30 %. Нормативы на химсостав стали дополнительно ограничивают $[Si]$ с учетом неточности экспресс-анализа пределами 0,17-0,27 %. Согласно ГОСТ отдел технического контроля предприятия принимает к разливке сталь с неоднородностью по кремнию в пределах $\epsilon_{a\%}^{Si}$, т.е. 0,015 %.

Поэтому разброс $[Si] = 0,16-0,26 \%$ является недопустимо большим. Гомогенизация по температуре согласно рис. 1 также не достигнута (технологически допустимый предел погрешности измерений +5 °С).

Увеличение расхода порошка ферросилиция до 60 и 90 кг/мин дополнительно увеличивает неоднородность стали после вдувания порошка до более чем 0,14% и 0,25 %, соответственно. Изменение расхода азота до 50 м³/ч к существенному изменению характера и количественных показателей распределения кремния в стали не приводит.

Последующая продувка расплава чистым азотом в течение 3 мин с расходом азота 40 м³/ч и глубине погружения фурмы $H_M = 1,4 \text{ м}$ улучшает гомогенизацию стали по кремнию. Неоднородность химсостава снижается с величины > 0,14 % до значения (0,05-0,06) %, что недостаточно. Это же касается и неоднородности по температуре (перепад выше 20 °С).

Лучшие результаты получаются при более глубоком погружении фурмы в расплав. При $H_M = 2,5 \text{ м}$, $Q_{N2} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ в течение 3 мин, разброс по содержанию кремния приближается к 0,02 %, что соизмеримо с погрешностью измерения. Отклонения температуры расплава не превышают 5 °С. Таким образом, последующая продувка в течение 3 мин в нижнем положении фурмы достаточна для гомогенизации стали по химсоставу и температуре.

Заключение

Установлено, что при снижении на границе сварного шва градиента концентраций

элементов-раскислителей, и прежде всего – кремния склонность зоны сварки судовой металлоконструкции к ЭХК падает. В то же время, понижение содержания кремния в одном из стальных компонентов сварного соединения (например, в сварном шве или в одной из соединяемых деталей) ниже 0,25 % приводит к резкому возрастанию электрического потенциала этого компонента, что может значительно увеличить склонность данного сварного

соединения к ЭХК. Наличие и направление градиента концентрации кремния на границе сварного шва является определяющим, какой элемент сварного соединения подвергается преимущественному разрушению при ЭХК: сварной шов либо околошовная зона. Выделены основные причины образования локальных очагов электрохимической коррозии, усугубляющих разрушение сварных соединений судовых металлоконструкций.

Литература

1. Веревкин В.И. Новая концепция снижения электрохимической коррозии обшивок судов (статья) / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов Часть 1. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 70-73.
2. Веревкин В.И. Влияние содержания кремния и деформации сварных узлов из судостроительных сталей на их склонность к электрохимической коррозии (статья) / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. // Морские интеллектуальные технологии. 3 (37) Т. 1 2017. С. 56-61.
3. Томашов Н.Д. Теория коррозии и коррозионные конструкционные сплавы [Текст] / Н.Д. Томашов, Г.П. Чернова. М.: Металлургия, 1993. 416 с.
4. Козырев Н.А. Производство железнодорожных рельсов из электростали [Текст] / Н.А. Козырев, В.П. Дементьев. Новокузнецк, Изд-во ИПК, 2000. 267 с.
5. Технические основы сталеплавильных процессов [Текст]. Учебное пособие для вузов / Р.С. Айзатулов, П.С. Харлашин, Е.В. Протопопов, Л.Ю. Назюта. М.: МИСИС, 2002. 320 с.
6. Берковский Б.М. Разностные методы исследования задач теплообмена [Текст] / Б.М. Берковский, Е.Ф. Ногатов. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.

References

1. Verevkin V. I. the New concept of reducing electrochemical corrosion of the sheathing of ships (article) / V. I. Verevkin, Igushev V. F., S. A. Turysheva. IV international scientific conference "Marine equipment and technologies. The security of the Maritime industry": theses of reports, Part 1. – Kaliningrad: publishing house of BARF, 2016. S. 70-73.
2. Verevkin, V. I., Influence of silicon content and deformation of welded assemblies from shipbuilding steels on their tendency to galvanic corrosion (article) / V. I. Verevkin, Igushev V. F., S. A. Turysheva. // Marine intelligent technologies. – 3 (37) vol. 1 2017. P. 56-61.
3. Tomasov N. D. Theory of corrosion and corrosion of structural alloys [Text] / N. D. Tomasov, G. P. Chernova. – M.: Metallurgy, 1993. 416 p
4. Kozyrev N.. Manufacture of railway rails from Elektrostal [Text] / N.. Kozyrev, V. P. Dement'ev. – Novokuznetsk, publishing house of the IEC, 2000. 267 p.
5. Technical fundamentals of steelmaking processes]. Textbook for universities / R. S. Ayzatulov, P. C. Harlashin, E. V. Protopopov, L. Y. Nasuta. – M.: MISIS, 2002. 320 p.
6. Berkovsky B. M. Differential methods of research of problems of heat transfer [Text] / B. M. Berkovsky, E. F. Nogotov – Minsk: Nauka I Tekhnika, 1976. 144 p.

УДК 629.5.01

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

Александр Владимирович Дектярев

магистрант 2-ого курса

Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
nwasanches@mail.ru

Владимир Николаевич Морозов

кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
mvm3613@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрен спектр возможностей аддитивных технологий в судостроительной промышленности при трех основных ее структурах – судостроении, судомоделизме и судоремонте. В первой и третьей отрасли продемонстрированы результаты внедрения аддитивных технологий с конечными технико-экономическими показателями полученных объектов, во второй – представлены результаты экспериментов. Приведены ссылки на патенты и полезные изобретения в данной тематической деятельности, оценены преимущества аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами изготовления объектов, исследована динамика популярности поисковых запросов на подобную тематику в России и за рубежом. Проведено исследование относительно факторов успеха и замедления внедрения аддитивных технологий в судостроительную промышленность на основе уникальных и универсальных их составляющих. Дана оценка влияния аддитивных технологий, при процессах их внедрения, с выделением трех основных показателей – сроков, ресурсов и качества, на судостроительную промышленность в целом.

Ключевые слова: аддитивные, 3D-принтер, трехмерные, судостроение, судомоделизм, судоремонт, промышленность, машиностроение

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY AND PROSPECTS FOR THEIR DEVELOPMENT

Alexander V. Dektyarev

second-year undergraduate

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: nwasanches@mail.ru

Vladimir N. Morozov

PhD, associate professor of the Shipbuilding Department

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mvm3613@gmail.com

Abstract

The paper considers the spectrum of additive technologies in the shipbuilding industry with its three main structures - shipbuilding, ship modeling and ship repair. In the first and third structures, authors demonstrated the results of introducing additive technologies with final technical and economic indicators of the obtained objects, and in the second - the results of the experiments. The references to patents and useful inventions in this thematic activity are given, advantages of additive technologies in comparison with traditional methods of objects manufacturing are estimated, dynamics of popularity of search queries for similar subjects in Russia and abroad are researched. A study was made on the success factors and slowing of the implementation of additive technologies in the shipbuilding industry on the basis of unique and universal components. Also, the additive technologies influence estimation is given, with the processes of its implementation, with three main indicators - terms, resources and quality, allocated to the shipbuilding industry as a whole.

Keywords: additive, 3D-printer, three-dimensional, shipbuilding, ship modeling, ship repair, industry, engineering

Введение

С 1986 года, когда первый прототип 3D-принтера появился на свет, прошло уже 30 лет. За это время аддитивные технологии прочно вошли и закрепились во многих отраслях различных производств. С научной точки зрения, данная технология, если брать за основу прототип 1986-го года, сильно изменилась по своим составляющим в части самих 3D-принтеров, а также технологии работы с ними. В этом легко убедиться если изучить материалы глобальной медиакомпании 3D Printing Industry (3DPI) [1], которая создает оригинальный контент, ориентированный на последние разработки в области 3D-печати и 3D-сканирования. Это доказывают патенты и полезные изобретения как на технологию производства объектов при помощи аддитивных технологий [2, 3], так и на совершенствование самой конструкции 3D-принтеров [4,5].

1. Перспективы аддитивных технологий в судостроительной промышленности

Рассмотрим, какую роль аддитивные технологии уже играют и могут сыграть в будущем в судостроительной промышленности.

По данным аналитического центра Нидерландского Национального института судоходства и судостроения (NISS) [6] 3D-печать уже к 2030-му году перевернет всю судостроительную отрасль таким образом, что придется полностью пересматривать подходы к проектированию и строительству судов. Сочетание компьютеризации и роботизации всего производства совместно с 3D-печатью развивается быстрыми темпами, о чем свидетельствуют многочисленные внедрения этих технологий в машиностроительные промышленности [7-10]. В NISS считают, что и судостроительная промышленность в ближайшее время должна взять 3D-печать на вооружение, т.к. именно эта тенденция полностью изменит и обновит морское судоходство.

На XVIII Всероссийской н/п конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении-2017» отмечалось, что изготовление объектов морской техники при использовании аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами строительства, дает следующие преимущества [11]:

- оптимизация конструкции изделия с целью сокращения сборочных единиц;
- сокращение расходов на НИОКР (быстрый переход от концептуальной модели, созданной дизайнером, к твердотельной 3D-модели для редактирования в специализированном ПО и изготовления в короткий срок нескольких прототипов);
- ремонт и воссоздание запасных частей для оборудования, снятого с производства (с

использованием 3D-сканеров, ПО и 3D-принтеров);

- изготовление макетов и других демонстрационных моделей;

- уменьшение расходов на производство (оперативное изготовление опытных, мелкосерийных и единичных изделий без отрыва основного производства от выпуска постоянной номенклатуры);

- модернизация точного литейного производства (печать на 3D-принтере вылавляемых и выжигаемых моделей сложной геометрической формы);

Согласно системе Google Trends [12] – в период с 2004 по 2012 годы в отечественном и мировом сегментах Интернета интерес к 3D-печати резко начал расти к 2013 году. Наибольший интерес проявляют азиатские страны – Корея, Гонконг, Тайвань, Сингапур. США расположились на 11-ом месте, Россия – на 16-ом (Рис. 1-4).

Согласно [13] и проведенному исследованию на платформе Google Trends [12], Южная Корея – наиболее передовая страна в этом отношении. Правительство Южной Кореи, впервые в мире, заявило о старте пятилетней исследовательской программы по разработке технологий промышленной 3D-печати для нужд судостроения. По их ожиданиям, реализация программы позволит освоить новые рубежи производственных технологий и снизить зависимость корейского судостроения от импорта. По данным [16] расходы на импортные комплектующие составляют около 50% от стоимости контрактов. За период с 2017 по 2022 года ученые и инженеры должны создать прикладную базу под запуск промышленной печати, что должно отразиться на снижении издержек в среднем на \$1,8 млрд. в год. Общий объем инвестиций составил порядка \$280 млн.

Стоит отметить, что подобные вопросы касательно актуальности, научной новизны и методологии исследования рассматривались ранее в работах [14, 15].

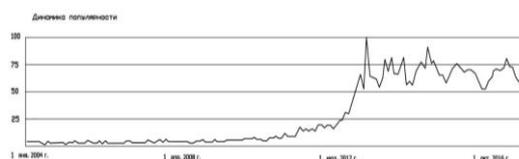


Рис. 1. Динамика популярности запросов на тему 3D-принтеры в мире

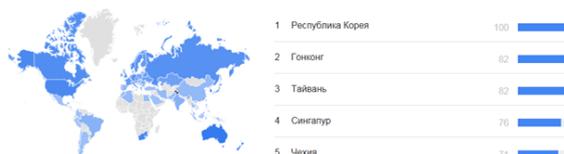


Рис. 2. Рейтинг стран по популярности поисковых запросов

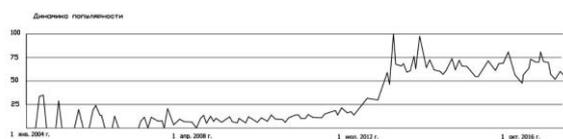


Рис. 3. Динамика популярности запросов на тему 3D-принтер в России

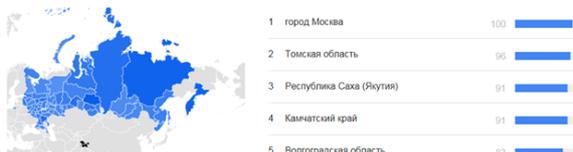


Рис. 4. Рейтинги регионов РФ по популярности поисковых запросов

Для дальнейшего внедрения аддитивных технологий в судостроение, в первую очередь, требуется полностью пересмотреть вопросы конструкции корпуса судна и рассматривать его как модель изделия не сварочного производства, а как объекта, выполненного при помощи методов, доступных в современной 3D-печати. В истории имеется такой прецедент – когда в 30-ых годах прошлого столетия сварка заменила клепку, что сказалось на конструкции корпуса судна.

Наиболее важным аспектом работы с аддитивными технологиями являются не только экономические, но и физико-химические характеристики конечных продуктов. Рассмотрим материал, наиболее часто встречающихся в 3D-печати – АБС-пластик и два производных продукта на его основе – RDG FC 720 и RGD 515/535 [16]. Основные характеристики конечного продукта представлены в табл. 1..

Таблица 1

Физико-химические характеристики конечного продукта из АБС-пластика, напечатанного на 3D-принтере

Наименование материала	RDG FC 720	RGD 515/535
1	2	3
Цвет, внешний вид	желтоватый, полупрозрачный	светло-зеленый
Предел прочности на разрыв, МПа	60,3	55-60
Модуль упругости, МПа	2870	2600-3000
Относительное удлинение при разрыве, %	20	25-40
Прочность на изгиб, МПа	75,8	65-75
Модуль изгиба, МПа	1718	1700-2200
Предел прочности при сжатии, МПа	84,3	-
Ударная вязкость по Изоду, Дж/м	23,6	65-80
Твердость по Шору, Д	83	85-87
Твердость по Роквеллу, М	81	67-69
HDT (температура отклонения под	48,4	58-68

нагрузкой) при 0,45 МПа, оС		
HDT (температура отклонения под нагрузкой, после термической обработки) при 0,45 МПа, оС	-	82-95
HDT (температура отклонения под нагрузкой) при 1,82 МПа, оС	44,4	52-55
Зольность, %	0,01	-
Водопоглощение, %	1,53	-
Плотность, г/см3	1,17-1,18	1,17-1,18

Одним из главных вопросов аддитивного производства является прочностные характеристики конечного продукта. Часть из них указана в табл. 1. На прочность при 3D-печати, главным образом влияют: разрешение печати, высота слоя, температура печати, скорость печати, шаблоны заполнения и т.д. К примеру, при выборе шаблона заполнения для обеспечения дополнительной прочности следует выбирать шаблоны типа Solid Honeycomb, Triangular и Grid.

Рассмотрим некоторые примеры из судостроительной промышленности относительно применения аддитивных технологий в судостроении, судомоделизме и судоремонте.

2. Примеры применения аддитивных технологий

2.1 Судостроение

Первая в мире лодка, напечатанная на 3D-принтере и соответствующая всем стандартам маломерного судостроения (рис. 5), была создана американским инженером Джимом Смитом[17]. Лодку длиной 5,08 м и шириной 0,52 м пришлось разделить на 28 частей и печатать каждую из них отдельно. Объединение в единую конструкцию происходило при помощи латунных винтов и силиконовых уплотнителей. Общий вес водного транспорта составил 29,5 кг. Корпус имеет толщину 6 мм, в нем есть внутренние ребра жесткости. Процесс печати занял более 1000 часов, и это при том, что качество было выставлено на довольно низкий уровень 0,65 мм – для сокращения времени печати и расхода материалов. Благодаря этим особенностям лодка прочнее и легче, к тому же потребовалось меньше пластика.



Рис. 5. Напечатанная байдарка. Испытания и вид изнутри [20].

2.2 Судомоделизм

Примеры печати гребного винта представлены в [18]. Были сделаны два винта с шагами 60 мм и 65 мм при диаметре 65 мм. При экспериментальных испытаниях были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2
Экспериментальные данные по испытанию гребных винтов

Шаг – 60 мм			Шаг – 65 мм		
Ток, А	Обороты, об/мин	Тяга, кг	Ток, А	Обороты, об/мин	Тяга, кг
10	2400	1,10	10	2400	1,16
18	3200	1,53	19	2800	1,55

В результате эксперимента было выяснено, что при рабочем токе в 10 А более выгодным оказался винт с шагом 65 мм. После, были проведены аналогичные эксперименты с двухлопастными винтами – никаких изменений не последовало. При экспериментах с шагом 40 мм и саблевидными винтами результаты получились неудовлетворительными. Результаты эксперимента по саблевидным винтам представлены в таблице 3.

Таблица 3
Экспериментальные данные по испытанию саблевидного гребного винта

Ток, А	Обороты, об/мин	Тяга, кг
10	2200	0,83
19	2600	1,23

Далее была дополнительно распечатана направляющая губа. Результаты эксперимента с направляющей губой для винта шагом 65 мм представлены в табл. 4.

Таблица 4
Экспериментальные данные по испытанию саблевидного гребного винта

Ток, А	Тяга, кг
4	0,83
10	1,53

В результате эксперимента было выяснено, что направляющая губа дает ощутимый прирост. Так же, было опробовано увеличение площади лопастей, уменьшение скругления на концах лопасти, однако, прироста тяги это не дало.

2.3 Судоремонт

В судоремонтной отрасли интересен результат Национального научно-технологического института Чжун Шань в Тайване, который разработал первую локальную систему 3D-печати металлом [19]. Машина для аддитивного производства, имеющая объем сборки 250x250x250 мм и 500-ваттный лазер, изготавливает высококачественные запасные части (рис. 6) для подводных лодок типа Sea Lion,

Sea Tiger и Sea Dragon, которыми оснащена армия Тайваня. Новая платформа для 3D-печати может изготавливать детали с прочностью на разрыв до 1100 МПа, пределом текучести до 950 МПа и твердостью, превышающей 30 HRC. Продукция 3D-принтера отвечает стандартам по качеству аэрокосмических материалов AMS-6514, а также экономически выгоднее по сравнению с деталями, изготовленными методом литья.



Рис. 6. Примеры напечатанных металлических деталей (слева) и 3D-принтер для их печати (справа). Фото с [22]

Стоит отметить, что представленные результаты относятся, по большей части, к корпусному строительству судов. Относительно судового насыщения (кабельные трассы, системы трубопроводов, обшивка) уже неоднократно проводились высказывания, к примеру, в [20, 21] и изготавливать подобные конструкции, даже в заводских условиях, не представляет никакой сложности.

3. Перспективы аддитивных технологий

Рассмотрим далее факторы, согласно которым 3D-печать как может закрепиться в судостроительной отрасли, так и факторы, отрицательно влияющие на ее внедрение. Факторы были поделены на группу универсальных, подходящих для смежных отраслей, и уникальных, относящихся только к данному виду технологии.

3.1 Факторы успеха

3.1.1 Универсальные факторы

- Наличие финансовой поддержки для разработки и внедрения технологий;
- Рост научно-технического прогресса;
- Продолжение политики импортозамещения;
- Развитие отечественной инженерной мысли, продолжение традиций в области прорывных идей и смелых решений в производстве;
- Политика государства по поддержке предприятий, использующих на своем производстве инновационные технологии.

3.1.2 Уникальные факторы

- Рост числа работников инженерно-интеллектуальных специальностей;
- Закладка базовых знаний об аддитивных технологиях со школьной скамьи;
- Расширение сферы воздействия аддитивных технологий на разнообразные отрасли;

- Исследование аспектов работы не только с 3D-принтерами, как наиболее распространенным понятием в сфере аддитивных технологий, но и с 3D-сканерами, 3D-ручками и т.д.;

- Наличие современных производственных площадей, подходящих под специфику работы с аддитивными технологиями, либо же способные к переоснащению под работу с ними (например, переоборудование станка с ЧПУ под 3D-принтер).

3.2 Факторы риска

3.2.1 Универсальные факторы

- Отсутствие или недостаточная финансовая поддержка для разработок и внедрения технологий;

- Сворачивание политики импортозамещения;

- Неспособность принять решение и перейти к кардинальным переменам, заставляющим пересмотреть существующие стандарты, нормативы, требования и т.д.;

- Недостаточное количество специалистов инженерно-интеллектуального класса или же медленная динамика роста по возрастанию их числа;

- Отсутствие интереса со стороны государства.

3.2.2 Уникальные факторы

- Неспособность более консервативного слоя производителей отказаться от традиционных методов изготовления объектов;

- Потеря существенной части качественного рабочего класса;

- Отсутствие условий для внедрения всего объема аддитивных технологий в судостроительную промышленность;

- Высокая стоимость оборудования и материалов, небольшой выбор материалов в судостроительной отрасли, крупные первоначальные вложения.

4. Влияние аддитивных технологий на судостроительную промышленность

Ниже проведена оценка влияния аддитивных технологий на судостроительную промышленность. Выделены «три кита» современного изготовления объектов – сроки, ресурсы, качество:

4.1 Сроки

Основываясь на исследовании в строительной сфере [25], можно сделать выводы о сроках изготовления объектов морской техники. Сроки строительства при помощи аддитивных технологий в строительстве уменьшаются до 70% по сравнению с традиционными методами. Однако, по аналитическому суждению, эта цифра применительно к судостроению будет составлять порядка 40-50%.

4.2 Ресурсы

Рабочей силы, по сравнению с методами изготовления аддитивными и традиционными технологиями, потребуется в 1,5-2 раза меньше. Также можно существенно понизить расход строительных материалов (до 30-60%) из-за применения переработанных отходов.

4.3 Качество

В 3D-печати термин «качество» основывается на разрешении печати. Под разрешением печати, в общем смысле, понимается минимальная допустимая высота слоя материала, с которой может печатать конкретный 3D-принтер. К примеру, при использовании метода послойного наплавления толщина слоя составляет от 120 до 330 микрон. При печати металлом, точность изготовления деталей достигает 0,01 мм [23].

Заключение

Судостроение относится к консервативным секторам промышленности и тому есть множество объяснений. Но сегодня настало время кардинального изменения отношения к проектированию, строительству, эксплуатации и утилизации судов самого различного назначения: от гражданских судов до военных кораблей, от транспортных - до рыболовных, включая умные плавучие фабрики полной и глубокой переработки морепродукции, от судов на подводных крыльях и до яхт, прогулочных катеров и т.д.

С развитием Интернета Вещей (IoT), информационных, аддитивных и других современных технологий, ростом морской экономики и роли Мирового океана в жизни человечества отношение к развитию судостроения меняется. Развитие цифровых и аддитивных технологий, материаловедения, распределенных производственных сетей позволяет по иному посмотреть на перспективы развития судостроения в мире. И дает возможность России догнать свое отставание в этой области техники и производства.

Современное морское судно – сложное изделие, требующее применение самых современных технологических изысков и новаций. Поэтому очевидным путем решения проблемы является новая система организации судостроения, построенная на сетевом взаимодействии всех участников создания судна – от ученых, проектировщиков до технологов и судостроителей, от прибористов - до испытателей, от будущих мореплавателей – до работников судовых «умных» фабрик по переработке морепродукции. Она может быть выстроена в цифровом формате с применением современных компьютерных и аддитивных технологий, в частности в парадигме распределенной лаборатории [24].

В настоящее время по технологии печати на 3D-принтере осуществляется: изготовление

моделей и форм для литейного производства, репликация изделий (3D-сканер→3D-модель→3D-принтер), производство готовых деталей, создание сложных макетов изделий и архитектурных макетов, прототипирование деталей и изделий.

Аддитивные технологии становятся важнейшими для машиностроительной и обрабатывающей промышленности. В области 3D-печати наряду с однокомпонентной печатью (полимеры или металлы) наблюдается увеличение разработок с использованием

многокомпонентной печати – сочетание различных материалов. Преимущества такого способа производства очевидны: легкое изготовление прототипов, быстрая корректировка проектов, возможность применения сложных архитектурных решений, минимум человеческого труда.

Поэтому, можно сделать вывод: несмотря на то, что порог входа в эту индустрию высок, за такими системами – будущее не только судостроения, но и всего производства.

Литература

1. <https://3dprintingindustry.com/>.
2. <https://3dprintingindustry.com/news/former-lawrence-livermore-engineer-granted-metal-3d-printer-patent-seurat-technologies-118358/>
3. Изобретение к патенту РФ № 2015150549, 04.04.2014. Лjungблад У., Снис А. Способ и устройство для производства с помощью аддитивных технологий // Изобретение к патенту № 2630096. 2017. Бюл. № 25.
4. Полезная модель РФ № 2014147749/05, 26.11.2014. Изотов В., Федулов В., Тиханин А., Федулова Ю. Устройство многослойной поверхности зоны печати 3D-принтера, работающего по FDM-технологии // Полезная модель № 155702. 2015 Бюл. № 29
5. Полезная модель РФ № 2016107067/03, 26.02.2016. Кальницкий В. Несущий каркас для исполнительного механизма строительного 3D-принтера // Полезная модель № 166163. 2016, Бюл. № 32.
6. 3D Printing to rock the ship building industry until 2050 // Safety For Sea [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.safety4sea.com/3d-printing-to-rock-the-ship-building-industry-until-2050/> (дата обращения: 20.09.17 г.).
7. Cheney-Peters Scott, Hipple Mathew Print Me a Cruiser // Proceeding US Naval Institute. April 2013. Vol. 139/4/1. С. 322.
8. Акарачкин С., Ермаков Д. Применение аддитивной технологии при изготовлении каркаса статора электродвигателя-маховика // Вестник СибГАУ. - 2017. - Том 18, №1. - С. 10-14.
9. Дорошенко В. 3D-технологии для формовки и литья // Литье и металлургия. 2015. №30 (80). С. 30-39.
10. Лунева Д., Кожевникова Е., Калошина С. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник ПНИПУ, строительство и архитектура. 2017. Том 8, №1. С. 90-101.
11. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении-2017». СПб: 2017.
12. Google Тренды [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://trends.google.ru/trends/> (дата обращения: 10.09.17)
13. Business Korea [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://businesskorea.co.kr/english> (дата обращения: 10.09.17)
14. Дектярев А.В. Возможности применения 3D-принтеров в судостроительной промышленности // Материалы 67-ой Международной студенческой научно-технической конференции. - 2017.
15. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности // Материалы III Всероссийского конкурса "Молодой аналитик". 2017.
16. Канесса Э., Фонда К., Зеннаро М. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития. СПб: МЦТФ, 2013. 192 с.
17. James Rush, Emily Kent Smith. The world's first 3D printed kayak that took 42 days to print // Daily Mail. - 2014. 27.03.
18. "Весло". История создания // Сообщество владельцев 3D-принтеров "3D Today" [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://3dtoday.ru/blogs/segriv/the-paddle-the-history-of-creation/> (дата обращения: 16.05.15)
19. Taiwan's first metal 3D printer revealed, could help repair old submarines // 3ders [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.3ders.org/articles/20151006-taiwan-develops-its-first-metal-3d-printer-to-help-repair-old-submarines.html> (дата обращения: 17.06.15)
20. Баева Л., Маринин А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. - 2014. Том 17, №1. С. 7-12.
21. Дорохов А., Абачараев М. Аддитивные технологии в производстве корабельной энергетики // Вестник АГТУ, сер. Морская техника и технология. 2015. №2. С. 42-47.
22. World's first 3D-printed apartment building constructed in China // CNET [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/> (дата обращения: 13.04.15)
23. Martin J., Yahata B., Hundley J. 3D printing of high-strength aluminium alloys // Nature - international weekly journal of science. 2017. №549. С. 365–369.
24. Кострикова Н.А. Меркулов А.А., Яфасов А.Я. Технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов. С-Петербург МИТ, №3(37).Т.1. 2017 г. стр.135- 142.

References

1. <https://3dprintingindustry.com/>.
2. <https://3dprintingindustry.com/news/former-lawrence-livermore-engineer-granted-metal-3d-printer-patent-seurat-technologies-118358/>
3. Izobrenenie k patentu RF № 2015150549, 04.04.2014. Lyungblad U., Snis A. Sposob i ustroystvo dlya proizvodstva s pomoshch'yu additivnykh tekhnologiy. Izobrenenie k patentu № 2630096. 2017. Byul. № 25.
4. Poleznaya model' RF № 2014147749/05, 26.11.2014. Izotov V., Fedulov V., Tikhaniin A., Fedulova Yu. Ustroystvo mnogoslnoynoy poverkhnosti zony pechati 3D-printera, rabotayushchego po FDM-tekhnologii. Poleznaya model' № 155702. 2015 Byul. № 29
5. Poleznaya model' RF № 2016107067/03, 26.02.2016. Kal'nitskiy V. Nesushchiy karkas dlya ispolnitel'nogo mekhanizma stroitel'nogo 3D-printera. Poleznaya model' № 166163. 2016, Byul. № 32.
6. 3D Printing to rock the ship building industry until 2050. Safety For Sea [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.safety4sea.com/3d-printing-to-rock-the-ship-building-industry-until-2050/> (data obrashcheniya: 20.09.17 g.).
7. Cheney-Peters Scott, Hipple Mathew Print Me a Cruiser. Proceeding US Naval Institute. April 2013. Vol. 139/4/1. S. 322.
8. Akarachkin S., Ermakov D. Primenenie additivnoy tekhnologii pri izgotovlenii karkasa statora elektrodvigatelya-makhovika. Vestnik SibGAU. - 2017. - Tom 18, №1. - S. 10-14.
9. Doroshenko V. 3D-tekhnologii dlya formovki i lit'ya. Lit'e i metallurgiya. 2015. №30 (80). S. 30-39.
10. Luneva D., Kozhevnikova E., Kaloshina S. Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve i perspektivy ee razvitiya. Vestnik PNIPIU, stroitel'stvo i arkhitektura. 2017. Tom 8, №1. S. 90-101.
11. Materialy XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii MORINTEKh-PRAKTIK «Informatsionnye tekhnologii v sudostroenii-2017». SpB: 2017.
12. Google Trendy [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa <https://trends.google.ru/trends/> (data obrashcheniya: 10.09.17)
13. Business Korea [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa <http://businesskorea.co.kr/english> (data obrashcheniya: 10.09.17)
14. Dektyarev A.V. Vozmozhnosti primeneniya 3D-printerov v sudostroitel'noy promyshlennosti. Materialy 67-oy Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. - 2017.
15. Dektyarev A.V. Additivnye tekhnologii v sudostroitel'noy promyshlennosti. Materialy III Vserossiyskogo konkursa "Molodoy analitik". 2017.
16. Kanessa E., Fonda K., Zennaro M. Dostupnaya 3D-pechat' dlya nauki, obrazovaniya i ustoychivogo razvitiya. SPb: MTsTF, 2013. 192 s.
17. James Rush, Emily Kent Smith. The world's first 3D printed kayak that took 42 days to print. Daily Mail. - 2014. 27.03.
18. "Veslo". Istoriya sozdaniya. Soobshchestvo vladel'tsev 3D-printerov "3D Today" [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa <http://3dtoday.ru/blogs/segriv/the-paddle-the-history-of-creation/> (data obrashcheniya: 16.05.15)
19. Taiwan's first metal 3D printer revealed, could help repair old submarines. 3ders [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa <https://www.3ders.org/articles/20151006-taiwan-develops-its-first-metal-3d-printer-to-help-repair-old-submarines.html> (data obrashcheniya: 17.06.15)
20. Baeva L., Marinin A. Sovremennye tekhnologii additivnogo izgotovleniya ob'ektov. Vestnik MGTU. - 2014. Tom 17, №1. S. 7-12.
21. Dorokhov A., Abacharaev M. Additivnye tekhnologii v proizvodstve korabel'noy energetiki. Vestnik AGTU, ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2015. №2. S. 42-47.
22. World's first 3D-printed apartment building constructed in China. CNET [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa <https://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/> (data obrashcheniya: 13.04.15)
23. Martin J., Yahata B., Hundley J. 3D printing of high-strength aluminium alloys. Nature - international weekly journal of science. 2017. №549. S. 365–369.
24. Kostrikova N.A., Merkulov A.A., Yafasov A.Y. Synthesis technology of distributed intelligent control systems as a tool for sustainable development of the territories and complex objects. MIT, №3(37).T.1. 2017 r. p.135- 142.

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

УДК 621.3.026.5(06)

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ И КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ****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@kigtu.ru

Дмитрий Сергеевич Горбатов

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

Аннотация

Энергосистемы Калининградской области и стран Балтии работают в настоящее время в составе энергообъединения IPS/UPS. Интеграция энергетического рынка стран Балтии в Европу является приоритетной задачей ЕС и связана с отделением энергосистем стран Балтии от ЭО IPS/UPS и их подключением на синхронную работу в составе ЭО UCTE. При этом энергосистема региона перейдет в изолированный режим работы. В работе дан анализ состояния энергосистемы Калининградской области и реализации плана по развитию генерации и электросетевого комплекса. Для обеспечения функционирования энергосистемы Калининградской области в изолированном режиме завершается возведение четырех новых тепловых электростанций, что обеспечит баланс активной мощности в системе. В работе рассмотрен баланс реактивной мощности в Калининградской энергосистеме, и даны предложения по его обеспечению за счет ввода источников реактивной мощности на основе новейших технологий, что повысит надежность энергосистемы. Приведен ряд мероприятий, внедрение которых повысит надежность систем электроснабжения объектов морского базирования.

Ключевые слова: электроснабжение, энергосистема, активная и реактивная мощности, надежность, электрическая станция.

**ELECTRICAL SUPPLY OF MARINE INDUSTRY AND KALININGRAD
REGION OBJECTS****Valeriy F. Beley**

Dr.Sc.Tech., professor, head of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vbeley@kigtu.ru

Dmitry S. Gorbatov

PhD student of the department of electrical equipment of ships and electric power industry
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation
e-mail: gorbatovds@rambler.ru

Abstract

The power systems of the Kaliningrad Region and the Baltic States are currently operating as part of the IPS / UPS power association. Integration of the Baltic energy market into Europe is a priority task of the EU and is connected with the separation of the energy systems of the Baltic States from the IPS / UPS EO and their connection to the synchronous operation as part of the UCTE EO. At the same time, the energy system of the region will switch to an isolated mode of operation. The paper provides

an analysis of the state of the power system of the Kaliningrad region and the implementation of the plan for the development of generation and electric grid complex. To ensure the functioning of the power system of the Kaliningrad region in isolated mode, the construction of four new thermal power plants is completed, which will ensure the balance of active power in the system. The paper considers the balance of reactive power in the Kaliningrad energy system, and offers suggestions for its provision by introducing reactive power sources based on the latest technologies, which will increase the reliability of the power system. A number of measures have been introduced, the implementation of which will increase the reliability of power supply systems for sea-based facilities.

Keywords: power supply, power system, active and reactive power, reliability, electric station.

Введение

В связи с анклавным расположением и переходом энергосистемы Калининградской области на изолированный режим работы вопросы надежного электроснабжения региона являются приоритетными. Объекты морской индустрии: военно-морская база, морские порты - как обеспечивающие стратегическую безопасность региона требуют повышенного внимания и реализации мероприятий по обеспечению их надежного электроснабжения в нормальных и форс-мажорных ситуациях.

1. Состояние электроэнергетической системы Калининградской области

Энергосистемы Калининградской области (КО) и стран Балтии работают в составе энергообъединения (ЭО) IPS/UPS (рисунок 1). Интеграция энергетического рынка стран Балтии в Европу является приоритетной задачей ЕС. Ее конечным этапом является отделение энергосистем стран Балтии от ЭО IPS/UPS и подключение на синхронную работу в составе ЭО UCTE [1]. При этом энергосистема КО перейдет на изолированный режим работы.

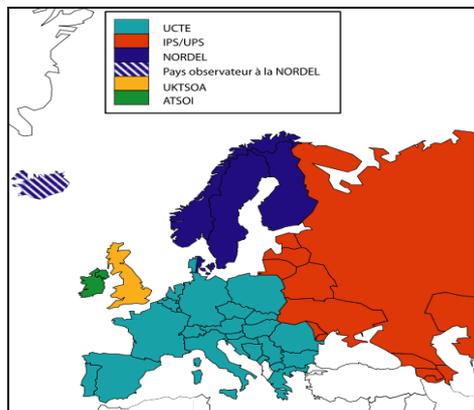


Рис. 1. Европейские энергообъединения

С целью обеспечения энергетической и политической безопасности региона, изолированная работа энергосистемы Калининградской области приобрела стратегическое значение. На сегодняшний день, при существующих источниках генерации (таблица 1), надежная работа в изолированном режиме не обеспечивается, что и показали две аварии в энергосистеме Калининградской области (11.08.2011 и 13.08.2013 года), когда

была потеряна связь с энергообъединением IPS/UPS [1-3].

Таблица 1

Объекты генерации энергосистемы КО

Объект генерации	Основной вид топлива	Мощность, МВт
Калининградская ТЭЦ-2	газ	900
Гусевская ТЭЦ	газ	8,5
ТЭЦ-10	мазут	24
Правдинская ГЭС-3	энергия воды	1,14
Озерская ГЭС	энергия воды	0,5
Зеленоградская ВетроЭС	энергия ветра	5,1
Суммарная установленная мощность станций		939,24

Для обеспечения функционирования энергосистемы Калининградской области в изолированном режиме в регионе завершается возведение новых тепловых электростанций (ТЭС) (таблица 2, рисунок 2), с реализацией схем выдачи мощности новых генерирующих энергообъектов. При этом, с целью обеспечения устойчивости энергосистемы при работе в изолированном режиме эксплуатации Калининградская ТЭЦ-2 переводится в режим работы полублоками.

Таблица 2

Новые ТЭС в энергосистеме Калининградской области [2]

ТЭС	Мощность, МВт	Топливо	Тип
Приморская	195 (3*65)	уголь	ПСУ
Прегольская	440 (4*110)	газ	ПГУ
Маяковская	160 (2*80)	газ	ГТУ
Талаховская	160 (2*80)	газ	ГТУ

Где: ПСУ – паросиловая установка, ПГУ - парогазовая установка, ГТУ- газотурбинная установка.

В перспективе в Калининградской области планируется возведение электростанций на основе использования: топливо-энергетических ресурсов региона: торф, утилизации твердых бытовых отходов и других видов биоресурсов;

возобновляемых источников энергии. Возведение этих электростанций приведет к созданию в регионе распределенной энергетики, что

повысит надежность электроснабжения региона, снизит потери в электроэнергетической системе, расходы на доставку газа и угля [1-3].

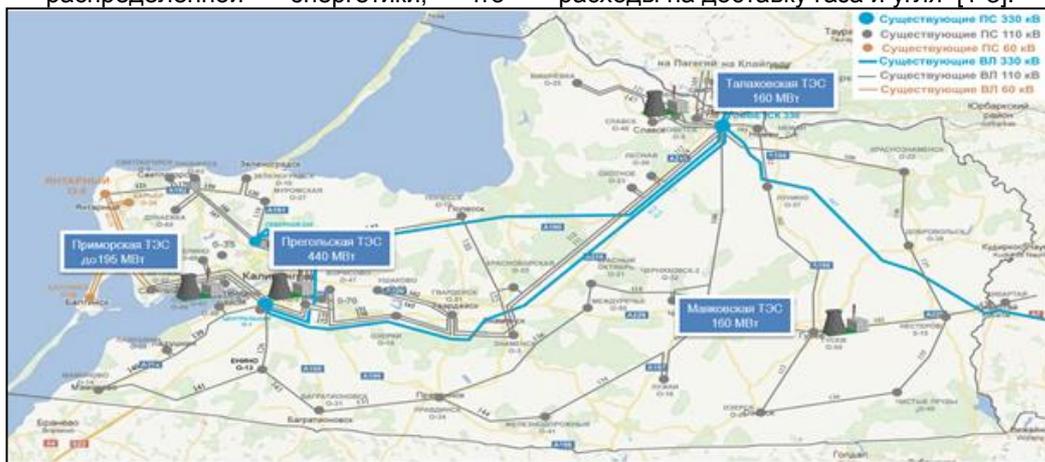


Рис. 2. Электроэнергетическая система Калининградской области

2. Повышение надежности энергосистемы за счет использования источников реактивной мощности

Как известно, частота электрического тока в энергосистеме определяется балансом активной мощности между генерацией и потребителями. Возведение новых электростанций в энергосистеме Калининградской области позволит решить вопросы по обеспечению баланса активной мощности.

Балансы активной и реактивной мощностей (РМ) взаимосвязаны, но уровень напряжения в узлах энергосистемы в основном определяет баланс РМ [1-5]:

$$\sum Q_G = \sum Q_{II} \quad (1)$$

где: $\sum Q_G$, $\sum Q_L$ – соответственно суммарные значения генерируемой и потребляемой РМ в энергосистеме.

В приходную часть баланса РМ энергосистемы входят ее генерация синхронными генераторами в режиме перевозбуждения и батареями статических конденсаторов (БСК), зарядная мощность линий электропередачи (в основном на напряжении 330 кВ).

Баланс РМ ЛЭП описывается выражением [5]:

$$\Delta Q = Q_C - Q_L = \left(\frac{b_C}{2} * U_H^2 + \frac{b_C}{2} * U_K^2 \right) - 3 I^2 X_L \quad (2)$$

где: U_H и U_K – соответственно напряжение в начале и конце линии электропередачи; b_C – емкостная проводимость линии электропередачи; X_L – индуктивное сопротивление линии электропередачи.

Причем, с позиций обеспечения надежности работы энергосистемы Калининградской области в изолированном режиме, эти системообразующие ЛЭП даже при малых нагрузках должны оставаться в эксплуатации.

В расходную часть баланса РМ (потребление) входят: потребление ее

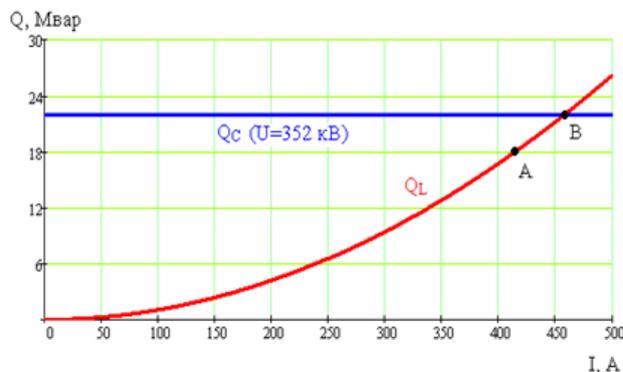


Рис. 3. Составляющие реактивных мощностей ЛЭП 330 кВ в зависимости от нагрузки

потребителями электроэнергии, трансформаторами, линиями электропередачи при режимах работы на мощностях больших натуральной, шунтовыми реакторами, синхронными генераторами электростанций в режиме недовозбуждения. В настоящее время к сетям энергосистемы подключены шунтовые реакторы, БСК (Таблица 3).

Таблица 3
Источники реактивной мощности энергосистемы Калининградской области

Тип	Параметры	Мощность, МВАр	$U_{ном}$, кВ
Шунтовой реактор (ШР)		2×29,7	10 (НН АТ)
Управляемый ШР		63	110
БСК		2×52 (44)	110

Вопросы по обеспечению баланса РМ Калининградской области требуют дополнительного анализа.

Для обеспечения нормального режима работы энергосистемы необходимо обеспечить баланс РМ как для системы в целом, так и для отдельных узлов питающей сети с наличием в них необходимого резерва РМ. Оптимальное

распределение и поддержание баланса РМ – одна из важнейших задач при эксплуатации и проектировании электрических систем.

Нарушение баланса РМ в электроэнергетической системе приводит к изменению напряжения в сети и может стать причиной аварии. Мониторингом расследований, было выявлено, что большинство произошедших тяжелых системных аварий, как в зарубежных, так и Российских энергосистемах были обусловлены результатом складывающегося дефицита РМ на момент возникновения и развития аварии (таблица 4).

Таблица 4
Системные аварии [4]

N	Дата	Место	Отключенная нагрузка, МВт
1.	19.12.1978	Франция	28000
2.	14.12.1982	Канада	15500
3.	27.12.1983	Швеция	11400
4.	12.01.1987	Франция	12000
5.	23.07.1987	Токио, Япония	9186
6.	18.04.1988	Канада	10000
7.	10.08.1996	США	30392
8.	25.05.2005	Московская ЭС	2500
		Тульская ЭС	900
		Калужская ЭС	100

Дефицит реактивной мощности складывался в момент возникновения и развития системного возмущения, когда при снижении напряжения ниже $U_{кр}$ процесс становился лавинообразным, неуправляемым, очень быстрым («лавина напряжения») и аварии на сегментах распределительной сети и/или трансформаторных подстанциях различного уровня становились неизбежными (рисунок 3).

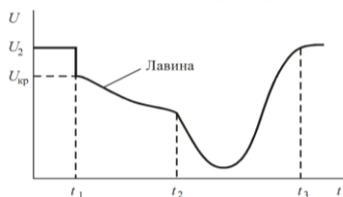


Рис.5. Развитие лавины напряжения в энергосистеме

В связи со строительством линий электропередачи напряжением 330 кВ, 110 кВ, вызванных реализацией схем выдачи мощности новых генерирующих энергообъектов, возникнет избыток РМ в энергосистеме Калининградской области в изолированном режиме работы, который будет иметь место преимущественно в ночные провалы нагрузок. Так зарядная мощность линий электропередачи напряжением 330 кВ в Калининградской энергосистеме составляет 117,82 МВАр при номинальном значении напряжения. При повышении напряжения на 10% зарядная мощность линий электропередачи увеличивается в 1,21 раза (формула 2).

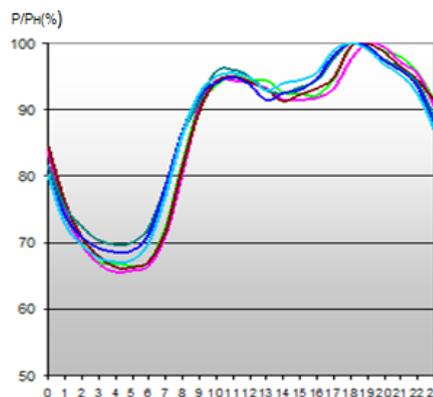


Рис. 4. Суточные графики нагрузки среднего зимнего рабочего дня энергосистемы Калининградской области

Для обеспечения баланса РМ в РФ в виду недостаточной мощности источников РМ используют синхронные генераторы электрических станций.

При этом заданное напряжение может поддерживаться только в том случае, если выработка генератором реактивной мощности находится в допустимых пределах [4]:

$$Q_{\min} \leq Q_g \leq Q_{\max} \tag{3}$$

Пренебрегая значением активного сопротивления обмоток статора, реактивную мощность неявнополюсного синхронного генератора можно рассчитать по выражению:

$$Q = \frac{U_1 \times E_0}{X} \cos \theta - \frac{U^2}{X} \tag{4}$$

Для явнополюсной

$$Q = \frac{U_1 \times E_0}{X_d} \cos \theta - \frac{U^2}{2} \left[\left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) - \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \right] \cos \theta \tag{5}$$

где: U_1 – напряжение сети; E_0 – Э.Д.С. синхронного генератора; X_q и X_d – соответственно синхронные индуктивные сопротивления генератора по продольной и поперечной осям.

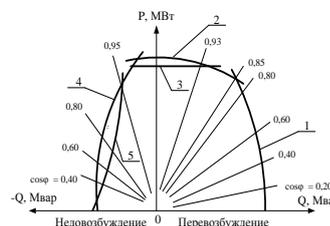


Рис.6. Диаграмма мощности турбогенератора [4]

Где 1 – зона, определяемая нагревом обмотки ротора; 2 – зона, определяемая нагревом обмотки статора; 3 – зона, определяемая наибольшей мощностью турбины; 4 – зона, определяемая нагревом элементов в концевых частях статора; 5 – зона, определяемая устойчивостью.

Как следует из рис.5 по условиям обеспечения устойчивости синхронного генератора выдача РМ в электрическую систему ограничена.

Режим недовозбуждения опасен тем, что в недовозбужденной машине происходит перераспределение магнитных потоков по сравнению с режимом перевозбуждения, и при этом магнитный поток в торцевой зоне статора увеличивается, что ведет к повышенному нагреву крайних пакетов ярма статора и ускоренному разрушению активной стали торцевых зон. Работа синхронного турбогенератора в режиме недовозбуждения приводит к снижению пределов статической и динамической устойчивости. Одной из задач надежного электроснабжения региона является составление баланса РМ Калининградской области для различных режимов эксплуатации и на его основе выполнения анализа, обоснования и использования в энергосистеме новейших технологий по источникам РМ: статических тиристорных компенсаторов и так далее [5].

3. Электроснабжение объектов морской индустрии

К объектам морского комплекса Калининградской области относятся:

- Балтийский флот — объединение Военно-Морского Флота России на Балтийском море.
- Калининградский морской торговый порт -

крупнейшее предприятие портового комплекса регион, Калининград.

- Калининградский морской рыбный порт, Калининград.

- База океанического флота, Пионерск

Все эти объекты расположены в акватории Самбийского полуострова, и подключены к Западному энергетическому кольцу (Рисунок 2). С целью обеспечения надежного функционирования этого кольца, в том числе при необходимости в изолированном режиме необходимо: перевести часть этого кольца с сети 60 кВ на 110 кВ; возвести дополнительно к Приморской ТЭС ряд малых электростанций на использовании топливноэнергетических ресурсов региона [1,4].

Заключение

В работе дан анализ состояния и перспективы развития Калининградской энергосистемы. Показано, что обеспечение баланса реактивной мощности системы за счет установки и оптимизации источников реактивной мощности новейших технологий позволит повысить надежность Калининградской системы. Приведен ряд мероприятий, внедрение которых повысит надежность систем электроснабжения объектов морского базирования.

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. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2016-2020 годы URL: <http://infrastruktura39.ru/upload/25.05.2015%D1%84.pdf> (дата обращения: 06.11.2017)
3. Белей В.Ф. Повышение энергобезопасности Калининградской области / V МЕЖДУНАРОДНЫЙ БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. С. 1052-1058.
4. Белей В.Ф., Горбатов Д.С. Баланс реактивной мощности в энергосистеме Калининградской области: проблемы и анализ их решения / V МЕЖДУНАРОДНЫЙ БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. С. 1059-1070.
5. Основные задачи формирования баланса РМ в ЕЭС России // Электрические станции. 2007. №3. С.65-73.

References

1. Belej V.F. Analiz variantov razvitija jelektrojenergetiki stran Baltii i Kaliningradskoj oblasti, IV MEZH DUNARODNYJ BALTIJSKIJ MORSKOJ FORUM [Elektronnyj resurs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2016. Pp. 896-909.
2. Shema i programma perspektivnogo razvitija jelektrojenergetiki Kaliningradskoj oblasti na 2016-2020 gody URL: <http://infrastruktura39.ru/upload/25.05.2015%D1%84.pdf> (data obrashhenija: 06.11.2017)
3. Belej V.F. Povyshenie jenergobezopastnosti Kaliningradskoj oblasti, V MEZH DUNARODNYJ BALTIJ-SKIJ MORSKOJ FORUM [Elektronnyj resurs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kalinin-grad: Izd-vo BGARF, 2017. Pp. 1052-1058.
4. Belej V.F., Gorbатов D.S. Balans reaktivnoj moshhnosti v jenergosiseme Kaliningradskoj oblasti: pro-blemy i analiz ih reshenija, V MEZH DUNARODNYJ BALTIJSKIJ MORSKOJ FORUM [Elektronnyj re-surs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2017. Pp. 1059-1070.
5. Osnovnye zadachi formirovanija balansa RM v EJeS Rossii // Jelektricheskie stancii. 2007. №3. Pp.65-73.

УДК 621.548; 621.311.24

ВЕТРОПАРКИ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ: НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ**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

Андрей Олегович Задорожный

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

Аннотация

В мире имеют место высокие темпы возведения ветропарков морского базирования. Это обусловлено высокой степенью приватизации и стоимостью земли, а также более высоким ветропотенциалом над морем. В работе приведены и дан анализ технических характеристик ветроэнергетических установок, предназначенных для использования в морских условиях. Так как в РФ имеется только ряд стандартов, в которых рассмотрены лишь общие вопросы ветроэнергетики, в работе показаны международные стандарты, которые могут быть полезны при проектировании ветропарков морского базирования. Мощность ветропарков морского базирования может достигать 1000 МВт. При мощностях более 300 МВт передача мощности через звено постоянного тока более эффективна, чем на переменном токе. В рамках проекта TACIS "Перспективы развития морской ветроэнергетики в акваториях Литвы, Польши и Калининградской области" были определены две площадки размещения ветропарков в акватории у берегов Балтийского моря, принадлежащих России. Как показали расчёты, возведение на этих площадках ветропарков морского базирования позволило бы выработать 1,6 млрд. кВт*час электроэнергии, что составляет 35,8% от всей потребляемой электроэнергии в Калининградской области в 2016 году.

Ключевые слова: ветропотенциал, скорость ветра, ветропарк морского базирования, мощность, электроэнергия.

OFFSHORE WIND PARKS: THE NEWEST TECHNOLOGIES**Valeriy F. Beley**

Dr.Sc.Tech., professor, head of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Andrey O. Zadorozhnyy

PhD student
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: windtechnology@mail.ru

Abstract

Nowadays, there are high rates of construction of sea-based wind farms in the world. It's connected with the high degree of privatization and the cost of land, as well as a higher wind potential over the sea. The paper presents technical characteristics of wind turbines intended for use in marine conditions and their analysis. Since there are only a few wind energy standards in the Russian Federation, the paper shows international standards that can be useful in the design of offshore wind farms. The capacity of offshore wind farms can reach 1000 MW. If capacities of wind farms are more than 300 MW, power transmission through the DC lines is more efficient than through the AC lines. Within the framework of the project TACIS 2006/214-473 POWER "Perspectives of Offshore Wind Energy development in marine areas of Lithuania, Poland and Russia" there were founded two places for the installation of offshore wind parks in the water area off the Baltic Sea, owned by Russia. As calculations have shown, the building of offshore wind farms on these places would allow to generate 1.6 billion kWh of electricity, which is 35.8% of all consumed electricity in the Kaliningrad region in 2016.

Keywords: wind potential, wind speed, offshore wind park, power, electrical energy.

Введение

Новым направлением современной ветроэнергетики являются ветропарки (ВП) морского базирования. Бурный рост этого направления в мире обусловлен высокой степенью приватизации и стоимостью земли, более высоким ветро-потенциалом, возможностью решения ряда экологических проблем. При проектировании и возведении ветропарков морского базирования используются новейшие технологии, а именно: безредукторные ветроустановки последних поколений, в которых решены вопросы стабилизации напряжения, автоматизации управления и прочее; при мощностях ветропарков более 300 МВт для связи с энергосистемой используются линии постоянного тока; новейшие подходы при проектировании и эксплуатации в составе энергосистем.

1. Анализ перспектив развития морской ветроэнергетики

Ветроэнергетика одна из наиболее динамично развивающейся отраслей энергетики. Планы, принятые в рамках международного проекта Wind Force 12 – довести производство электроэнергии за в мире до 12% к 2020 году. В последние годы наблюдается увеличение доли ветропарков морского базирования. В настоящее время в Европе действуют оффшорные ветровые электростанции суммарной мощностью порядка 14 ГВт. Ожидается, что их суммарная мощность к 2030 году может достичь 70 ГВт [1].

Таблица 1
Установленная мощность ВЭУ в мире на конец 2016 года (ГВт) [2]

N	Страна	Установленная мощность ВЭУ, ГВт		Доля*, %
		Всего	Морских ВП	
1.	Китай	148,6	1,48	4
2.	США	81,3	0,03	6,4
3.	ФРГ	49,7	4,11	16
4.	Англия	15,2	5,15	12
5.	Дания	5,24	1,27	43
6.	Россия	0,011	-	менее 0,1
	Мир	466,5	14,1	5

* - доля в энергетическом балансе страны

Удельная стоимость капитальных вложений в ВП морского базирования в 1,7-2 раза выше береговых. Рентабельными считают ВП, удаленные не далее 40 км и не ближе 1-1,5 км от берега – расстояние, при котором слабый сухопутный ветер успевает трансформироваться в более сильный морской.

2. Типы и электрические схемы ВП морского базирования

В ВП морского базирования используются ветроэнергетические установки (ВЭУ) мощностью от 5 до 10 МВт: на базе синхронного генератора с постоянными магнитами; отсутствие редуктора (редуктор основной источник шума ВЭУ), с низкой начальной скоростью (табл. 2, рис. 1).

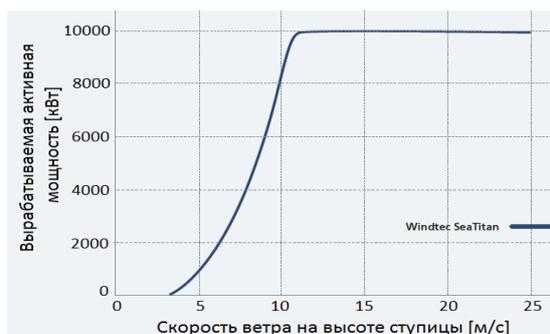


Рис. 1. Зависимость активной мощности ВЭУ SeaTitan 10MW от скорости ветра

В мире активно развиваются два направления возведения морских ветропарков: на плавучих платформах (рис. 2) и на шельфе на глубинах не более 25-35 метров.

Норвежская компания Statoil в 2016 году открыла первую в мире плавающую ветровую электростанцию мощностью 30 МВт (5*6 МВт, SWT-6.0-154) у берегов Шотландии в районе акватории Buchan Deer. Объект Nuwind занимает 4 квадратных километра. Глубина в месте размещения составляет 95-120 метров. 80% морского ветрового потенциала в Европе — это территории с глубиной, превышающей 60 метров, на которой возведение оффшорных ВЭУ с установленными на дне фундаментами не привлекательно с экономической точки зрения. Потенциал для плавающих ветровых электростанций огромен: порядка 4 000 ГВт только в Европе [3].

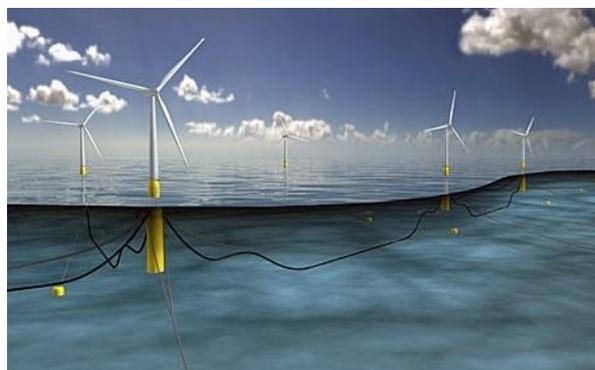


Рис. 2. Ветропарк морского базирования на плавучих платформах

Таблица 2

Технические характеристики ряда ВЭУ, предназначенных для эксплуатации в морских условиях

N	Фирма, страна	Модель	P, МВт	Скорость, м/с			Диаметр ротора, м	Ометаемая поверхность, м ²
				Vнач	Vном	Vкон		
1.	AMSC Windtec Solutions, США	SeaTitan 10MW	10	4	11,5	30	190	20 096
2.	Vestas, Дания	V164	9,5	4	13	25	164	21 124
3.	Siemens, ФРГ	SWT-8.0-154	8	3-5	13-15	25	154	18 600
4.	Enercon, ФРГ	E -126	7,58	3	16,5	34	127	12 668
5.	Suzlon – Repower, Индия	Repower 6.2M126	6,15	3,5	14	30	126	12 469
6.	Cinovel, Китай	SL6000/155	6	3,5	11	25	155	18 870

Мощность ВП морского базирования, как правило, очень значительна и может достигать 1000 МВт. Передача электроэнергии в энергосистему осуществляется через звено постоянного тока (рис.3а) или переменного тока (рис. 3б). При мощностях более 300 МВт передача мощности через звено постоянного тока более эффективна.

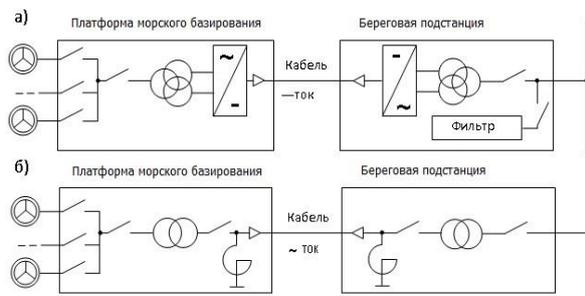


Рис. 3. Способы передачи электроэнергии от ВП в энергосистему

При планировании нового ВП оценивают: возможность подключения ВП к электрической сети в определенной точке сети; влияние подключения ВП на работу сети.

Возможность подключения ВП к электрической сети основывается на: соотношении (1); комплексном расчете перетоков мощности в электрической сети; изменениях напряжения при коммутациях; расчете токов короткого замыкания; оценке фликера и высших гармоник.

$$\frac{S_{ВП}}{S_{КЗ}} \geq 0,02 \quad (1)$$

где $S_{ВП}$ – мощность подключаемого ВП; $S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения к сети.

Таким образом, подключение ВП к сети может быть ограничено техническими характеристиками сети, и стать причиной дополнительных затрат на усиление электрической сети в месте требуемого подключения. Пропускная способность электрической сети становится такой же важной характеристикой при определении места подключения ВП к сети, как ветропотенциал и другие. Определение пропускной способности

электрической сети необходимо, как в контексте разработки проекта строительства отдельного ВП, так и для планирования сети в целом.

В европейских странах с высоким процентом ветроэнергетики, системные операторы опубликовали требования к условиям функционирования ВП морского базирования для обеспечения энергетической безопасности системы: пределы значений напряжения в случае коротких замыканий, при которых ВЭС не должна отключаться от электрической сети, и может работать стабильно; требования поддержания напряжения в сети путем выдачи реактивной мощности во время падения напряжения; режимы работы ветроустановок при отклонениях частоты сети и т.д. Так, например, с 2008 года в Германии действует регламент аттестации ВЭС морского базирования, в основу которого легли требования, разработанные системным оператором E.ON (E.ON Netz GmbH) [4].

3. Нормативные документы

На сегодняшний день в РФ имеется ряд стандартов, в которых рассмотрены лишь общие вопросы ветроэнергетики, что создаёт значительные трудности при решении вопросов, связанных с внедрением ВЭУ в РФ. Выход из сложившейся ситуации видится в адаптации к российским условиям международных стандартов, норм и других нормативных документов в области ветроэнергетики. На настоящий момент разработку и модернизацию международных стандартов по ветроэнергетике ведут рабочие группы Технического Комитета - 88 (ТС-88) и Международная Электротехническая Комиссия (МЭК, IEC). В таблице 3 представлены международные стандарты, которые могут быть непосредственно полезны при проектировании морских ВП.

Основными критериями при выборе места строительства ВП морского базирования являются: среднегодовое значение скорости ветра на высоте установки ротора турбины, рельеф дна моря, миграционные стоянки и пути миграции птиц, зоны обитания и сезонной миграции рыб, используемые и планируемые коридоры для судоходства, подводные коммуникации и закрытые военные территории.

Таблица 3

Ряд международных стандартов в области ветроэнергетики [5]

N	IEC	Название стандарта
1.	61400-SER ed1.0 (2015-02)	Ветроэнергетические установки – все части
2.	61400-1:2005+AMD1:2010 CSVed3.1 (2014-04)	ВЭУ - Часть 1: Требования по проектированию
3.	61400-2 ed3.0 (2013-12)	ВЭУ - Часть 2: Требования по проектированию малых ВЭУ
4.	61400-3 ed1.0 (2009-02)	ВЭУ - Часть 3: Требования по проектированию ВЭУ морского базирования
5.	61400-21 ed2.0 (2008-08)	ВЭУ – Часть 21: Измерение и оценка показателей качества электрической энергии ВЭУ подключенных к электрической сети
6.	61400-22 ed1.0 (2010-05)	ВЭУ – Часть 22: Тестирование и стандартизация

Знание среднегодовой скорости ветра (v_{cp}) на уровне ступицы ветроколеса ВЭУ и зависимости активной мощности, выдаваемой ВЭУ от скорости ветра (рис. 1) позволяют по методике Рейлиха, рассчитать годовую выработку электроэнергии .

$$f_{y,i} = \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v_i-0,5}{v_{cp}}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v_i+0,5}{v_{cp}}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$W_{год} = \sum_{i=0}^T f_{y,i} \cdot P_i \cdot t \quad (3)$$

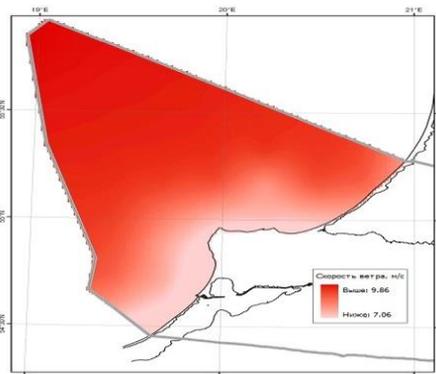
где v_i – действительная скорость ветра; $f_{y,i}$ – частотное распределение по скоростям; P_i – мощность, выдаваемая ВЭУ в сеть при данной скорости.

4. Ветропарки морского базирования в Калининградской области

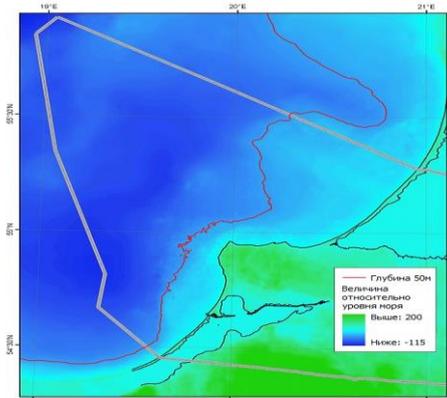
Рассмотрим на примере Калининградской области возможности по возведению ВП морского базирования. В рамках проекта TACIS 2006/214-473 “Перспективы развития морской ветроэнергетики в акваториях Литвы, Польши и Калининградской области” разработана карта оптимального размещения ветропарков в акваториях у берегов Балтийского моря, принадлежащая трём соседям: России, Литве и Польше. Основными задачами проекта TACIS являлись мониторинг приморских территорий и прилегающих акваторий, а также их планирование для установки ветропарков морского базирования.

В ходе выполнения проекта была составлена подробная карта распределения значений среднегодовых скоростей ветра на высоте 100 метров приморских территорий и прилегающей акватории Балтийского моря Калининградской области (рис. 4а). Также при участии Института Океанологии РАН им. П.П. Ширшова и Морского Института города Гданьска были получены необходимые данные по рельефу дна и составлена батиметрическая карта, совмещенная с топографической картой акватории Балтийского моря Калининградской области (рис. 4б). На батиметрической карте нанесена граница на территории акватории Балтийского моря (красная линия) указывающая на превышение глубины в 50 метров, строительство ВП за пределами которой, по техническим и экономическим

соображениям является не целесообразным. Подводные строительные-монтажные работы на больших глубинах чрезвычайно дороги и опасны.



а)



б)

Рис. 4. Карта среднегодовых скоростей ветра (а); батиметрическая карта акватории Балтийского моря Калининградской области б) близка 4

С учетом всех вышеперечисленных критериев и полученных в ходе реализации проекта TACIS данных было определено два места в акватории Балтийского моря Калининградской области для оптимального размещения ветропарков морского базирования: 1) площадью 28 км²; 2) 24 км² (рис.5).

Как показали расчеты, возведение на этих площадках ветропарков морского базирования позволило бы выработать 1,6 млрд. кВт*ч электроэнергии, что составляет 35,8% от всех



Рис. 5. Карта размещения морских ветропарков в акваториях у берегов Балтийского моря Калининградской области

потребляемой электроэнергии в Калининградской области в 2016 году (табл. 4).

С позиции популяризации ветроэнергетики в Калининградской области в период 1998-2002 гг. были установлены бывшие в употреблении ветроустановки (21 ВЭУ), переданные Данией в рамках международных соглашений.

Таблица 4

Годовая выработка электроэнергии действующим ветропарком в п. Куликово и перспективными ветропарками морского базирования Калининградской области

Установленная мощность ВП	Кисп	Вср, м/с	Количество и тип ВЭУ	Выработка млн. кВт·ч/год
ВП1: 240 МВт	0,46	8,6	24*ST10MW	783,0
ВП2: 210 МВт	0,5	9,3	21*ST10MW	827,8
5,1 МВт, п. Куликово (действующий)	0,19	6,5	20*Vestas V-27; 1* 600кВт	1,3 (2016 год)

Заключение

В работе приведены и дан анализ технических характеристик ветроустановок, предназначенных для использования при возведения ветропарков морского базирования. Показаны варианты подключения ветропарков к энергосистеме. Так как в РФ имеется только ряд стандартов, в которых рассмотрены лишь общие вопросы

ветроэнергетики, в работе показаны международные стандарты, которые могут быть использованы при проектировании морских ветропарков. В работе для двух площадок в акватории Балтийского моря спроектированы ветропарки мощностью 240 и 210 МВт, что позволит при их возведении выработать 35,8% от всей потребляемой в Калининградской области электроэнергии.

Литература

1. Aloys Nghiem, Iván Pineda. Wind energy in Europe: Scenarios for 2030, WindEurope, Belgium, 2017. С.7.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2017, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017.
3. Statoil открыла первую в мире плавающую ветровую электростанцию. [Электронный ресурс]. URL: <http://renew.ru/statoil-opened-first-floating-wind-farm-hywind/>
4. Requirements for Offshore Grid Connection in the E.ON Netz Network, E.ON Netz GmbH, Bayreuth, 1st April 2008.
5. International Electrotechnical Commission. Online Collections. [Электронный ресурс]. URL: <https://collections.iec.ch/iec61400?ref=gsprmo>
6. Белей В.Ф., Задорожный А.О. Ветроэнергетические установки в условиях холодного климата: новейшие разработки, опыт сооружения и эксплуатации. Энергетик. 2015. № 10. С. 42-47.
7. В.Ф. Белей, В.В. Селин, А.О. Задорожный, А.Ю. Никишин, Н.Н. Елагин, А.И. Соловей. Возобновляемые источники энергии: справочник модуля / под ред. В.Ф. Белея, В.В. Селина, А.О. Задорожного, А.Ю. Никишина, Н.Н. Елагина, А.И. Соловей. Калининград: ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2015. 257 с.: ил.

References

1. Aloys Nghiem, Iván Pineda. Wind energy in Europe: Scenarios for 2030, WindEurope, Belgium, 2017. P.7.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2017, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017.
3. Statoil odkryla pierwsza w mire plawayushchuyu vetrovuyu elektrostantsiyu. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://renew.ru/statoil-opened-first-floating-wind-farm-hywind/>
4. Requirements for Offshore Grid Connection in the E.ON Netz Network, E.ON Netz GmbH, Bayreuth, 1st April 2008.
5. International Electrotechnical Commission. Online Collections. [Электронный ресурс]. URL: <https://collections.iec.ch/iec61400?ref=gsprmo>
6. Beley V.F., Zadorozhnyy A.O. Vetroenergeticheskie ustanovki v usloviyah holodnogo klimata: novejshie razrabotki, opyt sooruzheniya i ekspluatatsii. Energetik. 2015. № 10. Pp. 42-47.
7. V.F. Beley, V.V. Selin, A.O. Zadorozhnyy, A.YU. Nikishin, N.N. Elagin, A.I. Solovej. Vozobnovlyaemye istochniki energii: spravochnik modulya / pod red. V.F. Beley, V.V. Selin, A.O. Zadorozhnyy, A.YU. Nikishin, N.N. Elagin, A.I. Solovej. – Kaliningrad: FGBOU VPO "KGTU", 2015. – 257 p.

УДК 621.12.061:628.169 (043)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ КАНАЛА ЖАЛЮЗИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ВТОРИЧНОГО ПАРА В СЕПАРАТОРАХ СУДОВЫХ ОПРЕСНИТЕЛЕЙ

Максим Игоревич Архипов

аспирант кафедры судовых энергетических установок и теплоэнергетики
Калининградский государственный технический университет
236022, 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
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alexandr.filonov@kigtu

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности вертикальных и горизонтальных жалюзийных сепараторов пара с различными профилями канала жалюзи при барботажном испарении солёной воды. Исследования проводились на экспериментальном стенде Калининградского государственного технического университета (КГТУ).

Эффективность сепараторов оценивалась по влажности пара после сепаратора, которая измерялась по солевой методике. Испытываемые вертикальные и горизонтальные жалюзийные сепараторы сечением 100x100 мм устанавливались в камерах испарения судовых опреснителей 2Д2М, 6А-25, 6МП-63, 6МП-60, 6МП-63 конструкции КГТУ. Исследована эффективность гравитационно-инерционного сепаратора Московского энергетического института (МЭИ).

В результате исследований были получены формулы для определения влажности пара после вертикальных и горизонтальных сепараторов с различным профилем канала жалюзи в зависимости от основных режимных параметров при барботажном кипении солёной воды.

Установлено, что эффективность горизонтальных и вертикальных жалюзийных сепараторов с различными профилями канала жалюзи при одинаковых режимных параметрах и давлениях пара $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа оказывается одинаковой. Полученные зависимости для расчета влажности пара после сепараторов на входе в конденсатор могут быть использованы для определения солёности дистиллята при проектировании камер испарения судовых опреснителей.

Ключевые слова: влажность пара, горизонтальный жалюзийный сепаратор, барботажное кипение, вертикальный жалюзийный сепаратор, капельный унос.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF CHANNEL LOUVRE TO THE EFFICIENCY STEAM SEPARATORS FOR SHIP DESALINATION PLANTS

Maksim I. Arkhipov

PhD student, ship power plants and heat power engineering department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: gromus08@bk.ru

Alexandr G. Filonov

PhD, associate professor, head of Ship power plants and heat power engineering department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: alexandr.filonov@kigtu

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of vertical and horizontal louvered steam separators efficiency with different profiles of the louvre channel during the bubbling evaporation of salt water. The research was conducted at the Kaliningrad State Technical University (KSTU) experimental stand.

The efficiency of the separators was evaluated by the moisture content of the vapor after the separator, which was measured by the salt method. The tested vertical and horizontal louvre separators with a cross section of 100x100 mm were installed in the evaporation chambers of ship desalination plants 2D2M, 6A-25, 6MP-63, 6MP-60, 6MP-63 of KSTU. The efficiency of the gravitational-inertial separator of the Moscow Power Engineering Institute (MEI) was examined as well.

The research resulted into formulas for determining the vapor humidity after vertical and horizontal separators with different profiles of the louver channel depending on the basic regime parameters in the salt water bubbling.

It is shown that the efficiency of horizontal and vertical separators with different profiles of the louvre channel at the same regime parameters and vapor pressures $P = 0.101$ MPa and 0.0199 MPa is the same. The formulas for calculating the steam humidity after the louvered plates separator at the inlet of the condenser can be used to determine the distillate salinity in design evaporation chambers of ship desalination plants.

Keywords: steam humidity, horizontal louvered plates separator, wire mesh separator, bubbling, liquid entrainment.

Введение

При проектировании камер испарения новых судовых дистилляционных опреснительных установок, а также при модернизации существующих опреснителей особое внимание уделяется определению размеров парового объема камеры с учетом эффективности используемых паросепарационных устройств.

Окончательная, тонкая очистка вторичного пара от мелких, трудноулавливаемых, транспортируемых паром капель испаряемой воды в камерах испарения отечественных опреснителей, осуществляется в вертикальных и горизонтальных жалюзийных сепараторах [1-3, 9-12].

Анализ литературных данных [1-8], показывает, что эффективность работы сепараторов тонкой очистки пара оценивается в настоящее время по зависимостям, полученным на основании результатов экспериментальных исследований. Достаточно подробно проведены исследования жалюзийных сепараторов и имеются данные по оценке их эффективности в области избыточных давлений пара применительно к аппаратам барботажного типа ТЭС и АЭС и технологическому оборудованию химической и газовой промышленности.

Подробных исследований особенностей процесса «тонкой» очистки вторичного пара в каплеуловителях, применяемых в камерах испарения судовых вакуумных опреснителей при значениях влажности набегающего потока пара менее (0,1 - 0,01) %, которая обеспечивается сепараторами грубой очистки, не проводилось. Не существует единого мнения о влиянии начальной влажности пара, профиля сепарирующего канала и давления пара на величину конечной влажности ω_k и критической скорости пара в жалюзийных сепараторах $W_{кр}$, при которой имеет место срыв отсепарированной пленки влаги, вызывающий резкое увеличение влажности пара за сепаратором. Влияние

солёности рассола на ω_k исследовано только для горизонтальных жалюзи при постоянном весовом уровне над греющей секцией для области избыточных давлений.

В связи с этим, является актуальным проведение исследований влияния режимных и конструктивных параметров жалюзийных сепараторов на эффективность тонкой очистки пара на специально разработанных для этой цели экспериментальных установках.

Целью настоящей работы является исследование влияния геометрических характеристик профиля канала жалюзи на величину ω_k для вертикальных и горизонтальных жалюзийных сепараторов судовых опреснителей при барботажном кипении солёной воды на экспериментальной установке, конструкция которой позволяет определять влажность пара и эффективность жалюзийных сепараторов по солевой методике, через коэффициент уноса иона натрия и количество влаги, оседающей на стенках экспериментального участка, улавливаемой в ловушках [9-11].

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследуемые вертикальные жалюзийные сепараторы и гравитационно-инерционный сепаратор МЭИ устанавливались после поворота в сепарационной камере экспериментального стенда на высоте парового объема от «зеркала испарения» $H_{но} = 0,45$ м. Горизонтальные жалюзийные сепараторы устанавливались в повороте на высоте парового объема $H_{но} = 0,435$ 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 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. 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 выбиралось из условия обеспечения устойчивого существования паровой подушки под листом и изменялось в зависимости от производительности стенда. При $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа оно 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.

Подробное описание методики проведения экспериментов и конструкции стенда приводится в работах [11, 12].

2. Исследуемые жалюзийные сепараторы

1. Геометрические характеристики профиля канала жалюзи без учета толщины пластины δ связаны между собой следующими зависимостями /6/

$$2. \quad A \cdot \sin \alpha = 2 \cdot R - (2R - C - t) \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

$$3. \quad b = t \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

$$4. \quad h = A \cdot n + 2 \cdot a, \quad (6)$$

где

5. A – расстояние между впадиной и выпуклостью пластин;

6. R – радиусгиба пластин;

- 7. C – перекрытие одной пластины другой;
- 8. t – расстояние между пластинами (шаг);
- 9. h – длина пакета пластин;
- 10. n – число ступеней сепарации;
- 11. α – половина угла поворота потока;
- 12. a – длина входного и выходного участка канала жалюзи.

13. Пять характерных геометрических размеров профиля связаны между собой формулой (4). Изменение одного из размеров приводит к изменению какого-то другого, если остальные размеры остаются неизменными.

14. Согласно результатам теоретических исследований [6, 8] при наличии перекрытия пластин C параметры A и R можно считать не влияющими на работу жалюзи. Наибольшее влияние на эффективность работы жалюзи в том случае, когда имеется перекрыша одной пластины другой, оказывают шаг t и угол поворота потока $2 \cdot \alpha$.

Для исключения влияния t все исследованные сепараторы имели одинаковое расстояние между пластинами 10 мм и отличались профилями канала жалюзи, а также расположением пакета в паровом объеме (см. табл. 1).

15.

Таблица 1

Характеристики исследуемых жалюзийных сепараторов

№ п/п	Профиль канала жалюзи	t, мм	C, мм	Тип сепаратора
1.	«а»	10	5	вертикальный
2.	«б»	10	10	вертикальный
3.	«а»	10	5	горизонтальный
4.	«б»	10	10	горизонтальный
5.	«в»	10	3	горизонтальный
6.	«а»	10	5	гравитационно-инерционный

Сепараторы сечением 100×100 мм собиравались из штампованных пластин, изготовленных из меди, или нержавеющей стали (рис. 1, 2).

Геометрические характеристики испытываемых профилей криволинейных каналов жалюзи представлены на рис. 3.

Проведение исследований профилей «а» и «б» представляло интерес в связи с тем, что сепараторы с аналогичными профилями канала жалюзи применялись в камерах испарения судовых опреснителей 6А-20, 6А-25 ОМЧ, 6МП-50, 6МП-60, 6МП-63, 2Д2М, которые были разработаны в КГТУ под руководством профессора Г.Я. Лукина и установлены на судах промышленного флота. Профиль «в» использовался МЭИ в ранее выполненных исследованиях эффективности гравитационно-инерционного, вертикального и горизонтального жалюзийных сепараторов при избыточных давлениях и был выбран для сопоставления

наших результатов с данными работ авторов [6, 7].



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

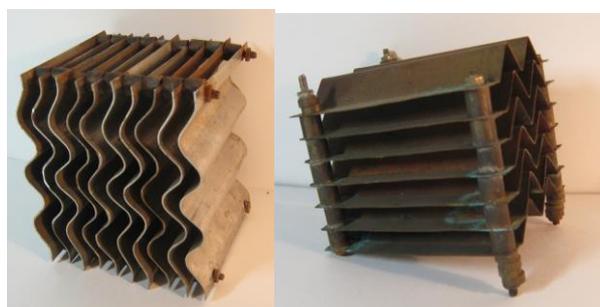


Рис.2. Исследуемые горизонтальный сепаратор № 5 и гравитационно-инерционный сепаратор № 6

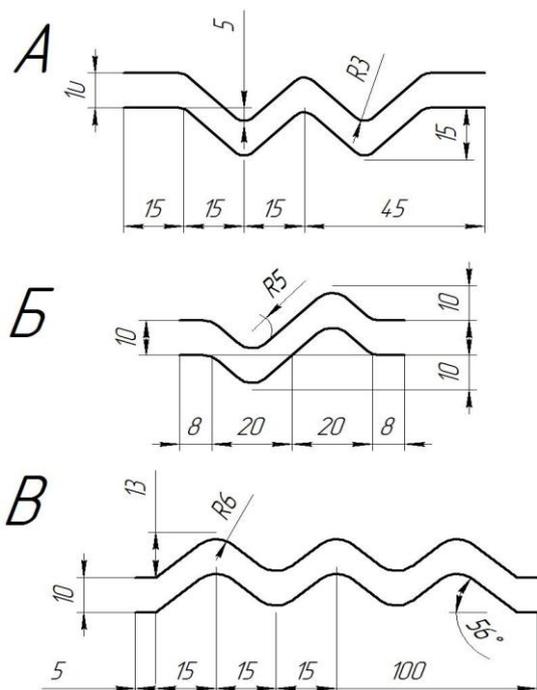


Рис. 3. Геометрические характеристики профилей криволинейных каналов исследуемых жалюзийных сепараторов

3. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис. 4-5. представлены результаты экспериментальных исследований зависимости влажности пара после сепаратора от скорости W_c , полученные на солёной воде при давлениях $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа и постоянной скорости пара в испарителе $W_o = 0,33$ м/с и $1,6$ м/с соответственно. Там же приводятся значения влажности пара на входе в сепаратор ω_c перед поворотом потока пара на входе в сепарационную камеру ω_p .

Как видно из рис. 4, в опытах на атмосферном давлении значения конечной влажности после вертикальных сепараторов № 1, 2 и ГИС № 6 снижались с ростом W_c , а кризис отсутствовал из-за низких значений начальной влажности пара перед сепараторами. Влажность пара после вертикальных сепараторов № 1, 2 с профилями канала жалюзи «а» и «б» оказалась одинаковой.

Конечная влажность после горизонтального каплеуловителя № 4 и гравитационно – инерционного сепаратора № 6 с профилем канала «а», с углом наклона пластин для отвода уловленной влаги $\gamma = 9^\circ$ отличалась от значений, полученных после сепараторов № 1, 2 не более, чем в 1,4 раза.

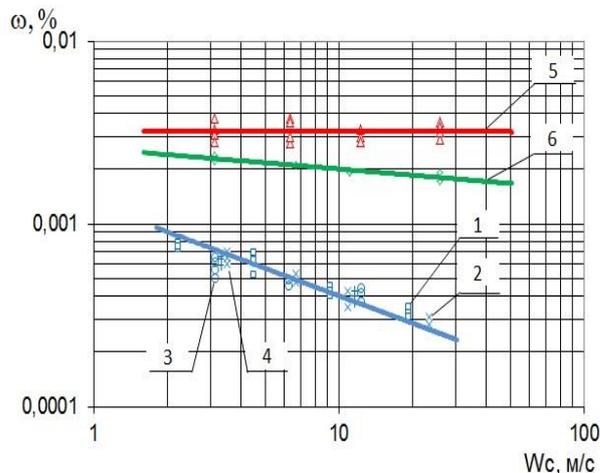


Рис. 4. Влажность пара после жалюзийных сепараторов различного типа при $P = 0,101$ МПа, $W_o = 0,33$ м/с: 1 горизонтальный сепаратор № 4; 2 вертикальный сепаратор № 1; 3 гравитационно-инерционный сепаратор № 6; 4 влажность пара на входе в поворот; 5 влажность пара на входе в вертикальный сепаратор

В исследованиях эффективности ГИС, вертикальных и горизонтальных сепараторов № 1-6, проведенных при $P = 0,0199$ МПа (рис. 5), величина конечной влажности пара также слабо зависела от профиля канала жалюзи и не зависела от значений влажности на входе в сепаратор и способа расположения пакета жалюзи в паровом объеме.

Несмотря на то, что влажность на входе в горизонтальные жалюзийные сепараторы № 3-5, по сравнению с вертикальными № 1, 2 была

выше примерно в двадцать шесть раз $\omega_p = (0,097-0,14) \%$, конечная влажность после всех этих сепараторов была практически одинаковой.

Эффективность ГИС № 6 в интервале скоростей $W_c = (20,8-58) \text{ м/с}$ оказалась примерно одинаковой с другими сепараторами, а значения его критической скорости не превышали эту величину для вертикальных каплеуловителей № 1, 2.

Профиль канала жалюзи и способ установки пакета жалюзи в экспериментальном участке стенда оказывали влияние на величину критической скорости потока пара $W_{кр}$, которая в вертикальных жалюзи примерно в (3,6-3,8) раза превосходила $W_{кр}$ для горизонтальных.

Такое различие можно объяснить не только преимуществами пленочного дренажа влаги в вертикальном пакете жалюзи, но и высокой эффективностью поворота потока перед вертикальными сепараторами, где значения влажности снижались до $\omega_c \approx 5 \cdot 10^{-3} \%$.

Максимальные значения коэффициента очистки пара $K_o = \omega_p / \omega_c \approx (430-750)$ имели горизонтальные сепараторы № 3, 5, однако достигнутая минимальная влажность пара после них была выше, чем после вертикальных сепараторов № 1 $K_o = \omega_c / \omega_k \approx (20-70)$, № 2 и гравитационно-инерционного сепаратора $K_o = \omega_c / \omega_k \approx (28-40)$, так как кризис в этих каплеуловителях наступал при больших W_c .

Из рис. 5 видно, что наибольшую критическую скорость имел вертикальный сепаратор № 1 с профилем канала «а», наименьшей обладал горизонтальный сепаратор № 4 с профилем канала «б», у которого величина $W_{кр}$ была ниже приблизительно в 2 раза, чем у каплеуловителей № 3, 5.

Меньшие значения критической скорости пара, полученные для профиля «б» в вертикальных и горизонтальных каплеуловителях, вероятно вызывались значительным перекрытием S , при котором имело место увеличение скорости W_c в суживающейся части канала, что приводило к преждевременному срыву пленки отсепарированной влаги с пластин жалюзи.

Значения критической скорости пара для горизонтальных сепараторов № 3-5 зависели от профиля канала жалюзи в большей степени, так как влажность на входе в эти каплеуловители была значительно выше $\omega_p = (0,097-0,14) \%$, а дренаж сепарата с пластин жалюзи осуществлялся менее эффективным способом - навстречу входящему потоку пара.

При наступлении кризиса величина конечной влажности после горизонтальных сепараторов № 3-5 с ростом скорости набегающего потока пара нарастала быстрее, чем после вертикальных и ГИС, так как влажность на входе в сепараторы № 3-5 была выше (рис. 5).

Визуальные наблюдения за работой каплеуловителей показали, что срыв пленки с выходных кромок жалюзи у вертикальных сепараторов № 1 и 2 протекает по-разному. В сепараторе № 1 с профилем канала «а» срыв влаги происходил с нижней части выходной поверхности пластин на расстоянии (10-15) мм от нижних кромок жалюзи, а также с поверхности распорных колец. В сепараторе № 2 с профилем канала «б» пленка влаги срывалась со всей нижней половины выходной кромки жалюзи.

Подтопление нижних кромок пластин жалюзи на (5-7) мм уловленной влагой, скапливающейся на дне сепарационной камеры, приводило к появлению зыби на поверхности сепарата в результате динамического воздействия потока пара, выходящего из каналов сепаратора. В связи с этим, во время проведения экспериментов вся влага, уловленная вертикальными сепараторами, непрерывно отводилась из сепарационной камеры в пробоотборные емкости.

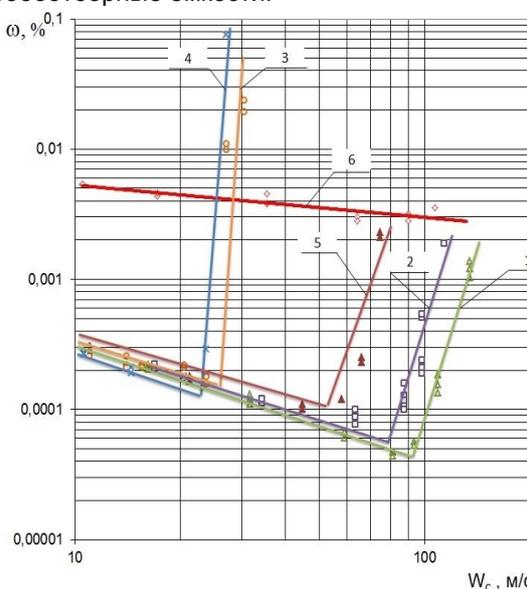


Рис. 5. Влажность пара после после жалюзийных сепараторов различного типа при $P = 0,0199 \text{ МПа}$, $W_0 = 1,6 \text{ м/с}$:

- 1, 2 вертикальные жалюзийные сепараторы № 1, 2;
- 3, 4 горизонтальные жалюзийные сепараторы № 3, 5;
- 5 гравитационно-инерционный сепаратор № 6;
- 6 влажность пара на входе в вертикальные и гравитационно-инерционный сепараторы

Кризис в исследуемых на вакууме, вертикальных сепараторах начинался несколько раньше, чем происходило увеличение влажности пара на входе в конденсатор. Сдуваемая к выходным кромкам пластин, пленка влаги сначала начинала дробиться потоком пара на немногочисленные отдельные крупные капли, которые, пролетев незначительное расстояние, оседали на стенках сепарационной камеры, не вызывая увеличения солёности дистиллята.

Начало кризиса в горизонтальных каплеуловителях на вакууме сопровождалось резким увеличением влажности ω_c после

поворота на входе в сепарационную камеру и одновременным ростом солености дистиллята. Эксперименты показали, что работа жалюзийных сепараторов на этой стадии отличается неустойчивостью. Колебания действительного уровня рассола в испарителе в пределах ± 20 мм приводили к резким скачкам влажности после сепаратора.

На рис. 6 приведены значения влажности пара ω_p , ω_c , измеренные перед горизонтальными и вертикальными сепараторами соответственно, а также значения конечной влажности после сепараторов ω_k , полученные при постоянной высоте парового объема и действительном уровне воды в испарителе в зависимости от солености испаряемой воды $S_p = (1,4-90,0)$ г/л по NaCl.

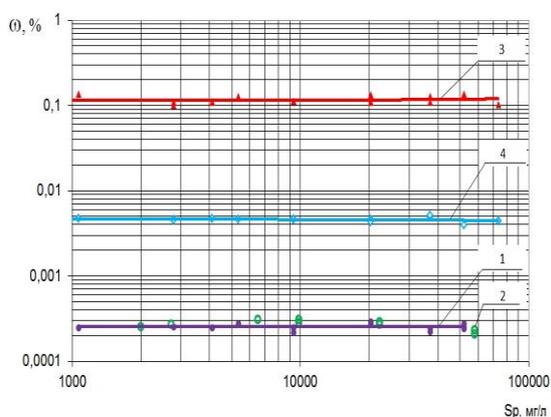


Рис. 6. Влажность пара после жалюзийных сепараторов в зависимости от солености испаряемой воды: при $P = 0,0199$ МПа; $W_0 = 1,6$ м/с: 1 вертикальный сепаратор № 1, $W_c = 15,8$ м/с; 2 горизонтальный сепаратор №3, $W_c = 14,1$ м/с; 3 влажность пара на входе в поворот; 4 влажность пара на входе сепаратор

Так же, как и в опытах с вертикальным сетчатым сепаратором конечная влажность пара после жалюзи не зависела от солености испаряемого рассола в условиях проведения опытов. Аналогичный результат был получен в опытах с вертикальным жалюзийным сепаратором №1 для $P = 0,101$ МПа; $W_0 = 0,33$ м/с; $W_c = 3,1$ м/с [11].

Как видно из рис. 6, влажность пара после горизонтального и вертикального сепараторов с профилем канала типа «а» также оказалась примерно одинаковой, несмотря на то, что значения ω_p на входе в горизонтальный сепаратор № 3 значительно превосходили значения ω_c на входе в вертикальный сепаратор № 1. Коэффициент очистки пара в повороте $K_0 \approx 26$ был выше, чем у сепаратора №1, отделившего только мелкие транспортируемые капли $K_0 \approx 17$. Максимальное значение коэффициента очистки имел горизонтальный сепаратор № 3 $K_0 \approx (360-370)$.

При обработке экспериментальных данных по жалюзийным сепараторам № 1-6 была установлена зависимость конечной влажности пара от основных режимных параметров и конструктивных характеристик исследуемых сепараторов для приведенной скорости пара в камере испарения менее 0,5 м/с

$$\omega_k = \frac{4,45 \cdot 10^{-3}}{(W_0)^{0,34} \cdot (W_c)^{0,5}} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22}, \% \quad (7)$$

Значения конечной влажности пара после жалюзийных сепараторов, полученные в наших исследованиях для приведенных скоростей пара в камере испарения более 1,0 м/с, оказалось возможным обобщить следующими зависимостями:

а) для сепараторов № 1, № 3, № 5

$$\omega_k = \frac{0,114}{(W_0)^{0,68} \cdot (W_c)} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \% \quad (8)$$

б) для сепараторов № 2, № 4, № 6

$$\omega_k = \frac{0,135}{(W_0)^{0,68} \cdot (W_c)} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \% \quad (9)$$

где ρ' и ρ'' плотности воды и пара соответственно. Отклонения экспериментальных данных от расчетных формул (7-9) не превышают 20 %. Погрешности определения влажности пара на входе в конденсатор, в сепарационную камеру и в поворот не превышали 5,8 %, 8,2 % и 10,1 % соответственно.

Сравнение результатов расчета влажности пара после горизонтального и вертикального жалюзийных сепараторов по формуле (7) с экспериментальными данными работ [6-7] при $P = 0,101$ МПа показывает их удовлетворительную сходимость.

Заключение

Экспериментально установлено, что влажность набегающего потока пара не оказывает влияния на конечную влажность пара после жалюзийного сепаратора.

Показано, что соленодержание испаряемого рассола в интервале (10^3-10^5) мг/л NaCl не влияет на величину конечной влажности пара после жалюзийного сепаратора, если действительный уровень испаряемой воды остаётся постоянным.

Установлено, что эффективность горизонтальных и вертикальных жалюзийных сепараторов с различными профилями канала жалюзи при одинаковых значениях приведенной скорости пара, давлении и скорости пара в сепараторе оказывается одинаковой.

Эффективность гравитационно-инерционного сепаратора в условиях, когда набегающий поток пара состоит из мелкодисперсной транспортируемой влаги, приближается к вертикальному сепаратору, а критическая

скорость пара в ГИС оказывается ниже. Получены зависимости для расчета влажности вторичного пара после вертикальных и горизонтальных жалюзийных сепараторов на входе в конденсатор в судовых вакуумных

опреснителях, в которых значения приведенной скорости пара превышают 1 м/с. Формулы позволяют определить солесодержание дистиллята при проектировании камер испарения судовых опреснительных установок.

Литература

1. Коваленко В.Ф., Лукин Г.Я. Судовые водоопреснительные установки. Л.: Судостроение, 1970. 304 с.
2. Лукин Г.Я., Колесник Н.Н. Опреснительные установки промышленного флота. - М.: Пищевая промышленность, 1970. 368 с.
3. Тихонов В.М. Экспериментальное исследование уноса и сепарации капель в вакуумных опреснителях: автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1978 20 с.
4. Ильющенко В.В. Закономерности адиабатного парообразования, уноса и сепарации влаги в опреснительных установках мгновенного вскипания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1988. 24 с.
5. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.
6. Девянин В.А. Выбор оптимальных условий работы жалюзийных сепараторов для парогенерирующих установок ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 20 с.
7. Рафаелян А.В. Повышение эффективности сепарирующих устройств аппаратов барботажного типа ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 18 с.
8. Стерман Л. С., Тишин С. Г., Печенкин С. П. Сопоставление эффективности различных типов жалюзийных сепараторов расчетами на ЭВМ. // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 1995. № 3. 4. С. 70-73.
9. 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.
10. Филонов А.Г., Юрков С.В. Исследование эффективности горизонтального жалюзийного сепаратора пара с различным числом полувольт в пластинах // Известия Калининградского государственного технического университета. Кал-д: КГТУ, 2013. № 29. С. 215-223.
11. 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.
12. 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.

References

1. Kovalenko V.F., Lukin G.Ya. Sudovye vodoopresnitel'nye ustanovki. L.: Sudostroenie, 1970. 304 p. (In Russian)
2. Lukin G.Ya., Kolesnik N.N. Opresnitel'nye ustanovki promyslovogo flota. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1970. 368 p. (In Russian)
3. Tikhonov V.M. Eksperimental'noe issledovanie unosa i separatsii kapel' v vakuumnykh opresnitelyakh. avto-ref. dis. kand. tekhn. nauk. M., 1978. 20 p. (In Russian)
4. Il'yushchenko V.V. Zakonomernosti adiabatnogo paroobrazovaniya, unosa i separatsii vlagi v opresnitel'nykh ustanovkakh mgnovennogo vskipaniya. Avto-ref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Sverdlovsk, 1988. 24 p. (In Russian)
5. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii. M., Vysshaya shkola, 1986. 448 p. (In Russian)
6. Devyanin V.A. Vybora optimal'nykh usloviy raboty zhalyuziynykh separatorov dlya parogeneriruyushchikh ustanovok TES i AES. Avto-ref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1985. 20 p. (In Russian)
7. Rafaelyan A.V. Povyshenie effektivnosti separiruyushchikh ustroystv apparatov barbotazhnogo tipa TES i AES. Avto-ref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1989. 18 p. (In Russian)
8. Sterman L.S., Tishin S.G., Pechenkin S.P. Sopostavlenie effektivnosti razlichnykh tipov zhalyuziynykh separatorov raschetami na EVM. Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika, 1995. № 3-4. p. 70-73. (In Russian)
9. Filonov A.G. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya solesoderzhaniya isparyaemoy vody na vlazhnost' para pri barbotazhnom kipenii. Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Kaliningrad State Technical University News]. 2011. № 21. p. 121-126. (In Russian)
10. Filonov A.G., Yurkov S.V. Issledovanie effektivnosti gorizontal'nogo zhalyuziynogo separatora para s razlichnym chislom poluvoln v plastinakh. Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. № 29. p. 215-223. (In Russian)
11. Filonov A.G., Arkhipov M.I. Materialy IV Mezhdunarodnogo Baltiyskogo Morskogo Forumu "Metodika issledovaniya effektivnosti paroseparatsionnykh ustroystv sudovykh parovykh kotlov i opresnitel'nykh ustanovok". Kaliningrad, 2016. p.363-368. (In Russian)
12. Arkhipov M.I., Filonov A.G. Issledovanie effektivnosti vertikal'nykh separatorov para sudovykh distillyatsionnykh opresniteley. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017, N 3 (37), V1, p.74-79. (In Russian)

РАСЧЕТ И КОНТРОЛЬ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ ПО ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Леонид Игнатьевич Ковальчук

доктор технических наук, профессор
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Марина Васильевна Исаева

аспирант кафедры судовых энергетических установок
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Аннотация

Целью настоящего исследования является расчет и контроль ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей. Исходными данными для расчета характеристики являются результаты стендовых испытаний нового двигателя. Практическую значимость такие характеристики имеют только в том случае, если они выражены в функции от информативных параметров доступных для оперативного контроля в судовых условиях. Такими параметрами, контролируемые штатными приборами, является температура отработавших газов по цилиндрам, частота вращения коленчатого вала двигателя, параметры воздуха перед впускными органами двигателя.

В статье показано, что на основе этих параметров могут быть сформированы количественные структуры устанавливающие взаимосвязь между входными и выходными параметрами двигателя, которые справедливы только для исходного состояния двигателя. В связи с этим предлагается контроль предельных значений выходных параметров осуществлять с учетом предварительной оценкой качества протекания рабочих процессов в цилиндрах.

Ключевые слова: судовой дизель, тепловая напряженность, ограничительные характеристики, расчет и контроль.

CALCULATION AND CONTROL OF THE DIESEL RATED CHARACTERISTICS OF MARINE DIESEL ENGINES

Leonid I. Kovalchuk

Dr.Sci.Tech., professor
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Marina V. Isayeva

PhD student of Ship Power Plants Department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Abstract

The purpose of this study is to calculate and control the thermal performance characteristics of marine diesel engines. The initial data for calculating the characteristic are the results of benchmark trials of the new engine. Such characteristics are of practical importance only if they are expressed in function from informative parameters available for operational control in ship conditions. These parameters, controlled by standard instruments, are the temperature of the exhaust gases in the cylinders, the engine speed of the engine crankshaft, air parameters in front of the engine intake ports.

The article shows that based on these parameters quantitative structures can be formed establishing the relationship between the input and output parameters of the engine which are valid only for the initial state of the engine. In connection with this, it is proposed to monitor the ultimate values of the output parameters taking into account the preliminary assessment of the work processes quality in the cylinders.

Keywords: ship diesel, thermal tension, restrictive characteristics, calculation and control

Введение

При работе дизеля с газотурбинным наддувом на режимах внешней скоростной характеристики номинальной мощности тепловая напряженность деталей цилиндропоршневой группы обычно возрастает. Поэтому дизелестроительные фирмы в соответствии с уровнем форсирования дизеля и его назначением ограничивают области режимов, допустимых для длительной эксплуатации, установлением специальной по тепловой напряженности характеристики. Эта характеристика соответствует режимам длительной работы двигателя при допустимых значениях показателей, характеризующих тепловую напряженность деталей цилиндропоршневой группы. Допустимые значения показателей теплонапряженности обычно определяют исходя из их уровня на номинальном режиме. Выполнение этого условия в процессе эксплуатации является гарантией сохранения показателей надежности, заложенных в конструкцию двигателя при проектировании и изготовлении.

Наиболее достоверная оценка теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы достигается при непосредственном измерении температур в их характерных точках. Однако такие измерения в эксплуатационных условиях практически не проводятся, поэтому в процессе эксплуатации тепловая напряженность оценивается по косвенным параметрам. Зависимости этих параметров от скоростного режима работы двигателя используется в качестве ограничительных характеристик. Следует отметить, что установленные таким образом ограничительные характеристики имеют практическую значимость в тех случаях, если дают возможность обслуживающему персоналу оперативно контролировать тепловое состояние деталей рабочих цилиндров в эксплуатационных условиях. Поэтому указанные характеристики должны задаваться в функции таких параметров, которые доступны для оперативного контроля на работающем двигателе.

Одним из наиболее доступных для контроля косвенных показателей теплонапряженности является температура отработавших газов по цилиндрам. Как правило, между температурой отработавших газов по цилиндрам и теплонапряженностью деталей цилиндропоршневой группы имеет место закономерная связь. Однозначность этой связи нарушается, если изменяется техническое состояние цилиндра или топливной аппаратуры, регулировка газораспределения, условия охлаждения или воздухообеспечения. При изменении одного или нескольких из этих условий численные значения температуры отработавших газов, соответствующее номинальному уровню теплонапряженности деталей цилиндра, будет изменяться.

Поэтому температуру отработавших газов по цилиндрам можно использовать как косвенный показатель теплонапряженности только в том случае, если налажен контроль за качеством рабочих процессов по цилиндрам.

1. Расчет и контроль ограничительных характеристик

Согласно результатам экспериментальных исследований, тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы наиболее полно характеризуется коэффициентом избытка воздуха при сгорании топлива [1,3].

Ниже рассматриваются алгоритмы формирования аналитических моделей, позволяющих контролировать коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива по цилиндрам, а следовательно, и уровни тепловой напряженности деталей цилиндров в эксплуатационных условиях по косвенным параметрам. Последовательность выполнения вычислительных операций по определению параметров таких моделей покажем на конкретном примере.

В качестве исходной информацией используем результаты стендовых испытаний двигателя 6ЧН36/45 при работе по внешней скоростной характеристике номинальной мощности. Для формирования моделей ограничительных характеристик по цилиндрам используем следующие информативные параметры: t_g - температура отработавших газов по цилиндрам, °С; n - частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; G_m - часовой расход топлива, кг/ч.

В последующих расчетах будем использовать безразмерные значения информативных параметров:

$$G_{mo} = \frac{G_m}{G_{mn}}; n_o = \frac{n}{n_n}; t_{go} = \frac{t_g}{t_{gn}}. \quad (1)$$

где индексом «н» обозначены значение параметров, соответствующие номинальному режиму работы двигателя: $G_{mn} = 255$, кг/ч; $t_{gn} = 440$, °С - температура отработавших газов на выходе первого цилиндра на номинальном режиме работы двигателя; $n_n = 500$, мин⁻¹.

На рис. 1 дано графическое представление зависимостей $t_{go} = f(G_{mo})$ по цилиндрам. Это нелинейные зависимости, поэтому каждая из них аппроксимированная полиномом второго порядка:

1. $t_{go}^I = -0,4526 \cdot G_{mo}^2 + 1,0391 \cdot G_{mo} + 0,413$;
2. $t_{go}^{II} = -0,455 \cdot G_{mo}^2 + 1,0206 \cdot G_{mo} + 0,4118$;

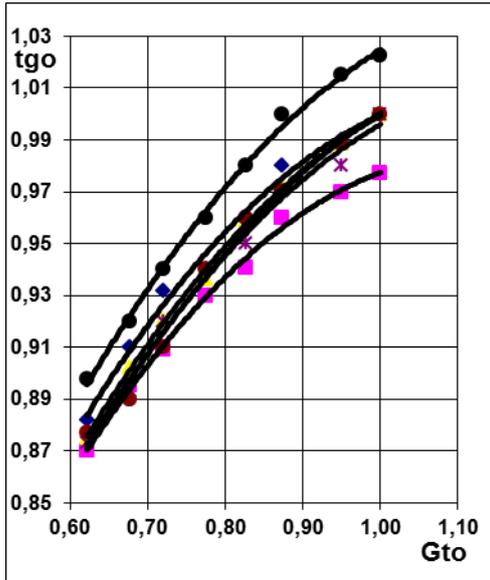


Рис. 1 Зависимости $t_{go} = f(G_{mo})$ двигателя 6ЧН36/45 по цилиндрам

3. $t_{gop}^{III} = -0,4189 \cdot G_{mo}^2 + 1,005 \cdot G_{mo} + 0,4124;$ (2)
4. $t_{gop}^{IV} = -0,4282 \cdot G_{mo}^2 + 1,0345 \cdot G_{mo} + 0,4183;$
5. $t_{gop}^V = -0,4078 \cdot G_{mo}^2 + 0,987 \cdot G_{mo} + 0,4168;$
6. $t_{gop}^{VI} = -0,3943 \cdot G_{mo}^2 + 0,9813 \cdot G_{mo} + 0,4137.$

На рис. 2 приведено сопоставление опытных и рассчитанных по уравнениям (2) значений температуры отработавших газов по цилиндрам по всему массиву исходных данных в виде зависимости $t_{go} = f(t_{gop})$, а на рис.3 гистограмма распределения погрешности расчета. Видно, что уравнения (2) воспроизводят весь массив исходных данных с погрешностью не превышающей $\pm 0,8\%$.

Систему уравнений (2) используем для определения уравнений ограничительных по тепловой напряженности характеристик по цилиндрам в соответствии с условием $\alpha_o = \frac{\alpha}{\alpha_n} = 1,0$. Для этого выразим относительное значение часового расхода топлива через параметры воздуха перед выпускными органами двигателя и частоту вращения:

$$G_{mo} = g_{yo} \cdot n_o = \frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot \frac{\eta_{no}}{\alpha_o} \cdot n_o, \quad (3)$$

где g_{yo} - относительная величина цикловой подачи топлива; P_{ko} и T_{ko} - относительные значения давления и температуры воздуха перед выпускными органами двигателя; η_{no}, α_o -

относительные значения коэффициента наполнения и коэффициента избытка воздуха.

В (3) положим $\frac{\eta_{no}}{\alpha_o} = 1,0$. С учетом этого

условия, после подстановки (3) в (2), получим уравнения ограничительных по тепловой напряженности характеристик, определяющие предельные значения температур отработавших газов по цилиндрам в соответствии с условием

$$\frac{\eta_{no}}{\alpha_o} = 1,0 :$$

1. $[t_{gop}^I] = -0,4526 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 1,0391 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,413;$
2. $[t_{gop}^{II}] = -0,455 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 1,0206 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,4118;$
3. $[t_{gop}^{III}] = -0,4189 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 1,005 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,4124;$ (4)
4. $[t_{gop}^{IV}] = -0,4282 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 1,0345 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,4183;$
5. $[t_{gop}^V] = -0,4078 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 0,987 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,4168;$
6. $[t_{gop}^{VI}] = -0,3943 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o)^2 + 0,9813 \cdot (\frac{P_{ko}}{T_{ko}} \cdot n_o) + 0,4137.$

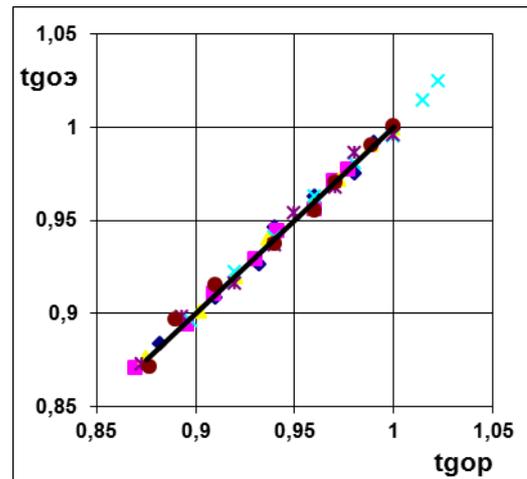


Рис.2 Зависимость $t_{go} = f(t_{gop})$

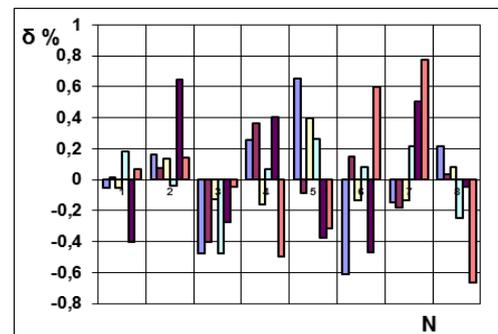


Рис.3 Гистограмма распределения погрешностей расчета $t_{go} = f(t_{gop})$ по уравнениям (2)

В системе уравнений (4) все информативные параметры контролируются штатными приборами, поэтому она может быть использована для оперативной оценки теплового состояния деталей цилиндропоршневой группы по цилиндрам в судовых условиях. Контроль режимов ограничительных характеристик по цилиндрам осуществляется по нижеследующему алгоритму.

1. Производится замер параметров G_m, t_g, P_k, T_k, n на 4-5 режимах внешней скоростной характеристики номинальной мощности.
2. Определяются безразмерные значения параметров $G_{mo}, t_{go}, P_{ko}, T_{ko}, n_o$
3. По уравнениям (2) определяются расчетные значения температур t_{gop} по цилиндрам.
4. Для оценки качества рабочих процессов по цилиндрам используется эталонная зависимость приведенная на рис.2, на которую наносятся зависимости $t_{g\omega} = f(t_{gop})$, соответствующие фактическим условиям сгорания топлива в цилиндрах. С учетом реальных отклонений фактических зависимостей $t_{g\omega} = f(t_{gop})$ по цилиндрам от эталонной делается заключение о качестве функционирования цилиндров.

5. Если отклонение фактически построенных зависимостей от эталонной не превышает $\pm 0,8\%$, по уравнениям (4) определяются предельные относительные значения температуры отработавших газов по цилиндрам.
6. Сравниваются замеренные и рассчитанные предельные относительные значения температур отработавших газов по цилиндрам.
7. Условия $t_{g\omega} < [t_{gop}]$ означает, что на данном цилиндре имеется запас по тепловой напряженности, а условие $t_{g\omega} > [t_{gop}]$ тепловую перегрузку цилиндра, для исключения которой необходимо уменьшить подачу топлива на двигатель пока не будет выполнено условие $t_{g\omega} = [t_{gop}]$

Заключение

В заключение следует отметить, что изложенные алгоритмы позволяют формировать ограничительные по тепловой напряженности характеристики на основе других информативных параметров (например, по среднему давлению отработавших газов на среднее индикаторное давление), при наличии технических средств для их оперативного контроля в судовых условиях.

Литература

1. Кузькин В.Г. Регулировка дизелей промысловых судов / В.Г. Кузькин, А.А. Минько.- М.: Агропромиздат, 1988. - 255 с.
2. Камкин С.В., Возницкий И.В., Большаков В.Ф. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок: Учеб. Для вузов – М.: Транспорт, 1996 - 432с.
3. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Теоретические предпосылки и алгоритм формирования моделей для контроля режимов ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей, журнал «Судостроение» 4'2015 (812) июль-август, С.- 29-32
4. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Экспериментально - теоретические модели для диагностирования рабочих процессов в цилиндрах судовых дизелей, журнал «Двигателестроение» 4'2015 (262) .-С.30-33
5. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Алгоритм расчета ограничительной по тепловой напряженности характеристики судовых дизелей на основе результатов стендовых испытаний / Эксплуатация морского транспорта. - 2016. - № 3(80). - С. 61-69.

References

1. Kuzkin V.G. Adjustment of diesel engines of fishing vessels / V.G. Kuzkin, A.A. Minko .- M .: Agropromizdat, 1988. - 255 p.
2. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Bolshakov V.F. Operation of marine diesel power plants: For high schools - M .: Transport, 1996 – 432p.
3. Kovalchuk L.I., Isaeva M.V. Theoretical prerequisites and algorithm for the formation of models for controlling the regimes of thermal diesel-limited characteristics of marine diesel engines. Shipbuilding journal 4'2015 (812) July-August, 29-32p.
4. Kovalchuk L.I., Isaeva M.V. Experimental - theoretical models for diagnosing work processes in cylinders of marine diesel engines, journal "Dvigatelistroyeniye" 4'2015 (262).-P.30-33
5. Kovalchuk L.I., Isaeva M.V. Algorithm for calculating the limiting characteristics of marine diesel engines, based on the results of benchmark trials / Exploitation of marine transport. - 2016. - No. 3 (80). - P. 61-69.

УДК 621.9.047/048

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Марк Борисович Лещинский

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированного машиностроения
Калининградского государственного технического университета
236022, Калининград, Советский проспект, 1, 379/1
e-mail: mark.leschinsky@klgtu.ru

Тимофей Русланович Никулин

аспирант, ведущий инженер кафедры автоматизированного машиностроения
Калининградского государственного технического университета
236022, Калининград, Советский проспект, 1, 379/6
e-mail: timofey.nikuln@klgtu.ru

Аннотация

Разработана конструкция устройства для газопламенных работ, которая относится к технологическим процессам обработки металлов, а именно к устройствам реализации газопламенных работ, типа пайки, сварки, резки металлов, используя электрохимические способы получения гремучего газа для выполнения этих работ. Устройство пригодно для общепромышленного применения, **в том числе в судостроении и судоремонте, системе жилищно-коммунального хозяйства, для ремонта машин, строительной, сельскохозяйственной техники**, в ювелирном деле, при стоматологических работах, при термообработке металлов, полировке оргстекла и других работах. Проект ориентирован на материал сберегающие технологии, в том числе решена задача по конверсии объекта (щелочного аккумулятора) отработавшего свой ресурс по своему прямому назначению, а так же задача по улучшению экологической обстановки в зоне проводимых сварочных работ. Спроектированное и изготовленное устройство отличается высокими энергетическими характеристиками, высокой надежностью и ресурсом работы, а также низкой себестоимостью.

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

SOME PECULIARITIES OF THE NEW GENERATION HYDROGEN-OXYGEN GENERATOR

Mark B. Leschinsky

assistant professor, PhD.Sci.Tech.,
head of the Automated mechanical engineering department,
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1, 379/1
e-mail: mark.leschinsky@klgtu.ru

Timofey R. Nikulin

PG student,
leading engineer of the Automated mechanical engineering department,
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospekt, 1, 379/1
e-mail: mark.leschinsky@klgtu.ru

Abstract

The gas welding equipment has been designed which relates to the technological processes of metal processing purposes such as gas soldering, welding, cutting and melting metals. The equipment is using electrochemical processes to generate Brown's gas used in the construction. The hydrogen-oxygen generator is suitable for general industrial applications, specifically in the ship-building and repair, housing and utility services, automotive and agricultural spheres, precise soldering and melting works in jewelry and dental spheres, in the metal processing, polishing acrylic and many other works. This project is focused on saving the materials and resources including recycling (alkaline battery), as well as the task of improving the environmental situation in the area of conducted welding operations. The designed and manufactured hydrogen-oxygen generator is characterized by high energy characteristics, high reliability and service life, as well as low cost.

Keywords: electrolysis, gas flame works, welding, soldering, cutting, hydrogen-oxygen flame, alkaline batteries

Введение

Необходимость использования материал сберегающих технологий во всех отраслях

хозяйства является весьма актуальной задачей. Для решения этой задачи совершенствуются и сварочные технологии.

Высокая себестоимость получения ацетилена обуславливает развитие процессов газопламенной обработки материалов, для проведения которых можно использовать газы – заменители.

Газопламенную обработку можно проводить, используя генерируемое водородно-кислородное пламя, вместо применяемых сейчас газов [1]. Такая замена позволит отказаться от громоздкого, неудобного баллонного хозяйства. «Побочным эффектом» следует считать факт уменьшения загрязненности окружающей среды, так как конечным продуктом при сжигании водородно-кислородной смеси будет водяной пар. Эта технология относится к разряду энергосберегающих технологий, что так же определяет её перспективность.

В настоящее время разработаны электролизно-водные генераторы разной производительности, которые могут использоваться для многих технологий газопламенной обработки.

Недостатком известных электролизеров является значительная сложность конструкции, не высокая производительность и надежность, высокая цена никелевых пластин или пластин из нержавеющей высоко легированных никелем марок сталей, а значит и всей установки в целом.

Промышленные установки электролиза воды, в процессе которого получают водород и кислород, имеют низкий КПД. В связи с этим одной из важных проблем в водородной энергетике является поиск путей повышения эффективности электролизных установок.

Решить такую задачу только традиционными методами — разработкой новых электролитов, повышением плотности тока, за счет подогрева и перемешивания раствора и т. д. не представляется возможным. Электролизер и источник его питания должны рассматриваться как единая электрохимическая система, в которой обязательным и естественным является совершенствование обеих ее сторон, то есть, как электролизера с электролитом, так и источника питания.

Были поставлены задачи по упрощению конструкции электролизера, снижению его себестоимости, при одновременном повышении его энергетических характеристик.

Характеристика объектов и методов исследования

Остановимся на конструктивных отличиях новых технических решений предложенных для реализации в устройстве для газопламенных работ.

Известно, что в промышленности достаточно широко используются аккумуляторы, которые изготовлены из материалов, предназначенных для длительной работы в щелочных средах. При их работе происходит выделение водородно-кислородной смеси. Поэтому вполне реально для изготовления электролизера (ЭВГ) использовать щелочные аккумуляторы. Эта предпосылка и

легла в основу для разработки новой конструкции ЭВГ Рис. 1.

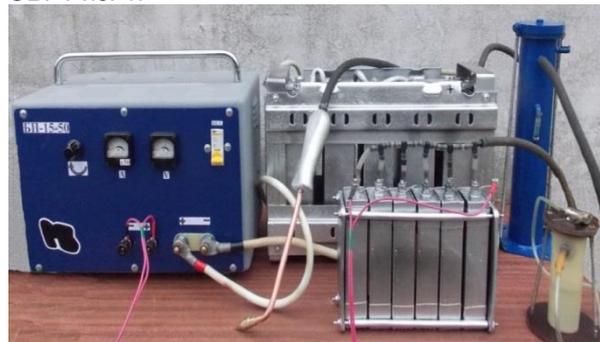


Рис. 1 Опытные экземпляры ЭВГ (два типоразмера)

Для получения необходимого технического результата в устройстве для газопламенных работ, содержащем горелку, гидрозатвор, электролизер для получения водорода и кислорода, блоки питания и управления, электролизер выполнен в виде батареи, составленной из отдельных электролизных ячеек, последовательно подключенных по току. В качестве отдельной электролизной ячейки используется банка железо-никелевого или кадмий-никелевого щелочного аккумулятора. Ячейки снабжены выходными патрубками для отвода полученных газов, связанными со сборным трубопроводом и гидрозатвором. В гидрозатворе находится вода с добавленными в нее летучими углеводородными соединениями, для коррекции состава пламени.

Основной элемент конструкции — аккумуляторные батареи, в том числе отработавшие свой ресурс и подлежащие утилизации, а значит, себестоимость электролизера в целом будет существенно ниже, чем у всех возможных прототипов (при одинаковой производительности по газу).

С целью определения технических характеристик ЭВГ для использования их, например, в условиях ремонтных мастерских судов рыбопромыслового флота или аналогичных им была проведена серия экспериментов. Остановимся коротко на некоторых из них.

Но вначале о конструкции щелочных аккумуляторов.

Наиболее распространенный тип щелочного аккумулятора с ламельными электродами состоит из следующих частей:

- положительных пластин, состоящих из плоских ламелей или трубок с навитой спиралью перфорированной ленты, в которых активным материалом является гидрат закиси никеля;
- отрицательных пластин, состоящих из плоских ламелей, в которых активным материалом является либо окись кадмия (в кадмиево-никелевых аккумуляторах), либо окись железа (в железо-никелевых аккумуляторах);

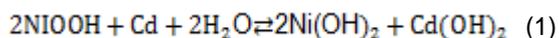
- электролита - раствора едкого кали или едкого натра в чистом виде либо с добавкой в них небольших количеств гидроокиси лития;
- сепараторов из полимерных материалов, устанавливаемых между пластинами разного знака заряда для фиксирования их положения в аккумуляторе;
- токоведущих частей - борнов, межэлементных соединений и других деталей крепления. Эти детали изготовляют из стали и никелируют гальваническим путем;
- стального сосуда, покрытого изнутри и снаружи слоем никеля толщиной 10-15мкм.

Ламели, в которых заключены активные массы положительных и отрицательных электродов, представляют собой плоскую коробочку, изготовленную из перфорированной и никелированной стальной ленты. Ламели изготовляют шириной 12,6 и 13,3 мм. Толщина ламелей для отрицательных пластин составляет 2,4-2,9 мм, а для положительных - 4,0-4,2 мм. Длина ламелей зависит от конструкции пластин, для которых они предназначены.

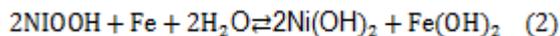
Таким образом, главное, что интересует нас это ламели – готовые электроды и корпус, эти элементы покрыты никелем, из которого и изготавливают, главным образом в промышленности элементы ЭВГ.

Суммарные реакции, протекающие в щелочных аккумуляторах:

в кадмиево-никелевых аккумуляторах



в железоникелевых аккумуляторах



Как следует из приведенных реакций (1,2), зарядный процесс для железного и кадмиевого электродов протекает одинаково, т. е. через образование анионов этих металлов, восстанавливающихся на катоде до металла. Однако ход зарядных кривых для железного и кадмиевого электродов различен.

Кривая заряда кадмиевого электрода имеет две четко выраженные потенциальные площадки. Первая из них отвечает восстановлению гидроокиси кадмия до металлического кадмия и мало отличается от стандартного потенциала кадмия. Вторая площадка заметно отличается от первой (примерно на величину, равную перенапряжению выделения водорода на кадмий). Поэтому выделение водорода при заряде кадмиевого электрода начинается лишь в самом конце зарядного процесса, то есть после того, как вся активная масса превратится в губчатый кадмий. По этой же причине почти весь зарядный ток расходуется на основной процесс, и лишь незначительная его часть — на выделение водорода.

На железном электроде, хотя его стандартный потенциал мало отличается от кадмия, соотношение потенциалов выделения металла и

водорода иное: восстановление окислов железа происходит с большим перенапряжением (около 0,25В в начале заряда), водородное перенапряжение на железе, наоборот, мало. Поэтому одновременно с восстановлением железа почти с самого начала заряда происходит разряд ионов водорода. В ходе заряда доля тока, расходуемая на выделение водорода, растет, а доля тока, идущая на восстановление железа, падает. Кривая заряда железного электрода не имеет четко разграниченных областей, отвечающих каждому из электродных процессов.

Исходя из вышесказанного выделение водорода в любом из типов аккумуляторов, будет связано с процессом заряда их, то есть от конкретной стадии электрохимических реакций протекающих в активной массе, а это снижает КПД ЭВГ изготовленных из них и увеличивает время выхода на рабочий режим. Поэтому нами было предложено полностью разрядить аккумулятор и подключить его к источнику тока в обратной полярности, то есть в процессе электролиза будут использоваться никелированные ламели, а их активная масса не только не будет тормозить процесс электролиза воды, но и предположительно будет улучшать выход газа по току. Это предположение было проверено в процессе эксперимента на одной электролитической ячейке

На Рис.2 показаны результаты эксперимента представленные в виде зависимости КПД электролиза воды в одиночных ячейках для трех вариантов их состояния.

На графиках видно, что во всем диапазоне токов при эксперименте КПД электролиза при включении ячейки по схеме обратной полярности явно выше. И ещё один важный вывод КПД электролиза по такой схеме может быть достаточно высоким.

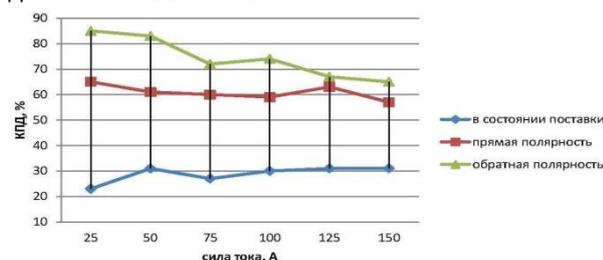


Рис. 2. КПД – сила тока

На следующем этапе эксперимента был собран ЭВГ из 8 кадмий-никелевых аккумуляторов марки КН-60 (Рис. 3.). По сравнению с конструкцией, представленной на Рис. 1 в него внесены изменения, в частности добавлен ресивер (питатель) с устройством предотвращающим заброс электролита в гидрозатвор. Кроме того в схему ЭВГ включён редукционный клапан (для стабилизации давления водород-кислородной смеси).



Рис. 3. Модернизированный вариант ЭВГ

В качестве источника питания ЭВГ использован инверторный источник тока с возможностью плавной регулировки (0-200А) Рис. 4.



Рис. 4. Плата инверторного источника

На начальном этапе электролизер, был изготовлен из отработавших свой ресурс щелочных аккумуляторов, на эту конструкцию получен патент на изобретение №2508970 [2]. Изобретение относится к технологическим процессам обработки металлов, а более конкретно к устройствам для выполнения газопламенных работ, типа пайки, сварки, резки металлов, используя электрохимические способы получения гремучего газа для выполнения этих работ. На следующем этапе был изготовлен опытный экземпляр ЭВГ Рис.5., включающий в себя модернизированные конструкции ресивера (питателя), блока гидравлических затворов и элементы защиты.



Рис.5. Опытный экземпляр ЭВГ

Существенной модернизации был подвергнут ресивер (питатель) Рис.6., теперь это горизонтально расположенная «труба» квадратного сечения оснащенная соответствующим набором опций.

Одним из недостатков предыдущего ЭВГ было отсутствие возможности автоматического управления уровнем электролита (конструкция Рис.1) в зависимости от режима его работы, сложность дозирования электролизера. Этот недостаток минимизирован в модернизированном варианте конструкции. Конструктивно ресивер выполнен из трубы квадратного сечения, который расположен над ячейками электролизера. Генерируемая смесь газов по сборному трубопроводу, имеющему выходы с двух его сторон, подается в нижнюю часть ресивера, который на 1/3 заполнен электролитом. Гремучий газ, проходя через жидкость и лабиринт образованный отбойниками, выходит через редукционный клапан и попадает далее в гидравлические затворы и горелку. Ресивер оснащен предохранительным реле предельного давления, манометром контроля рабочего давления и горловиной для заправки ЭВГ.

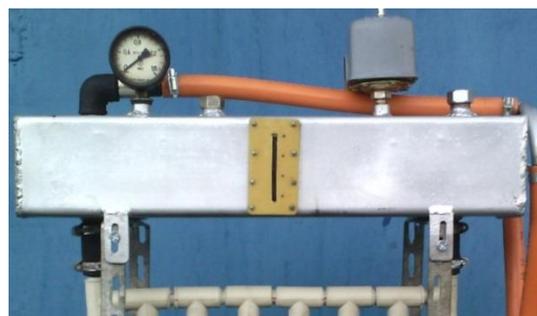


Рис.6. Ресивер – питатель

При запуске в ресивер вытесняется некоторый объем электролита, который зависит от производительности ЭВГ по току, а при выключении его за счет самовсасывания связанного с образующимся разрежением идет его дозправка. Таким образом, решен вопрос автоматического управления уровнем электролита в ЭВГ. Кроме того существенно упрощена заправка электролизера. Буферная емкость ресивера с электролитом, кроме того, выполняет роль дополнительной защиты ЭВГ от обратного удара, повышая тем самым безопасность эксплуатации оборудования. На эту конструкцию ресивера получен патент [3].

Установка комплектуется гидравлическим затвором, который служит для охлаждения смеси газов входящих из электролизера, промывки их, а также для защиты устройства в случае обратного удара пламени. Он также выполняет функцию осушителя, и устройства для регулирования состава газовой смеси (барботера), обеспечивающего обогащение водородно-кислородной смеси парами углеводородных соединений.

Конструкция гидравлического затвора описанного в [2] подверглась существенной модернизации.

Новая конструкция затвора представляет собой лабиринт, изготовленный из труб квадратного сечения, что повышает её технологичность при изготовлении Рис. 7.



Рис.7. Блок гидравлических затворов

В новой конструкции не используется вода как защитная среда от распространения пламени внутрь электролизера, а использовали дизельное топливо. Такой выбор был сделан потому, что в отличие от воды эта жидкость в присутствии щелочи не вспенивается и ещё дизельное топливо, находясь в затворе, оказывается безопасным в пожарном отношении. При запуске электролизера дизельное топливо под давлением образующихся газов перетекает из одной емкости затвора в другую, при этом растёт столб жидкости в выходном резервуаре, а значит, уменьшается объём газа, а это положительно влияет на безопасность работы оборудования в целом. При работе электролизера он естественно нагревается и при прекращении работы в нём создается некоторое разрежение под действием, которого дизельное топливо перетекает по каналам затвора обратно, но не засасывается в электролизер, поэтому ЭВГ всегда готов к работе, а обслуживание гидрозатвора минимизировано. На конструкцию затвора получен патент [4]

Как уже отмечалось выше, в качестве источника питания ЭВГ использован инверторный источник с возможностью плавной регулировки силы тока Рис. 8.



Рис.8. Инверторный источник питания ЭВГ

Который оснащен дополнительной опцией, в виде возможности автономного его использования в качестве источника сварочного тока для ручной дуговой сварки штучными электродами. Такое решение расширяет функциональные возможности устройства в целом.

Принцип работы инвертора можно описать следующим образом. При включении инвертора в сеть напряжение попадает на так называемый первичный выпрямитель. Здесь переменный ток превращается в постоянный (модуль 1) Рис.9. Затем он поступает в инверторный блок (модуль 2). Эта часть является одной из основных в устройстве инвертора. В инверторном блоке постоянный ток превращается снова в переменный, но он имеет частоту не 50 Гц, а 50кГц.

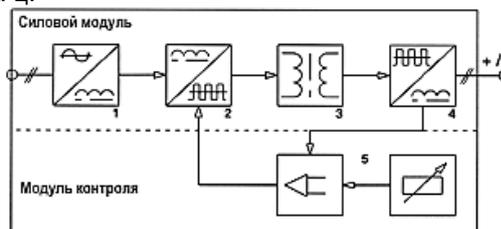


Рис.9 Блок схема инверторного источника

Дальше уже высокочастотное напряжение поступает на трансформатор (модуль 3). Он понижает напряжение тока, одновременно повышая его силу. Здесь кроется секрет компактности сварочного инвертора – высокочастотные трансформаторы имеют гораздо меньшие размеры и массу по сравнению с низкочастотными. Кроме того, потери тока в высокочастотном трансформаторе, в том числе уходящие на его нагрев, гораздо меньше, а это обеспечивает более стабильную работу инвертора и больший коэффициент полезного действия 90% и выше.

Следующий этап – вторичный выпрямитель (модуль 4), в котором переменный ток уже нужного напряжения снова преобразуется в постоянный. Затем он подается к нагрузке. Но это только основы – на самом деле инвертор устроен гораздо сложнее. В его устройстве есть еще управляющие блоки на основе микропроцессоров (модуль 5). Они включены по принципу обратной связи – то есть реагируют на малейшее отклонение тока и напряжения от оптимальных, постоянно корректируя их. Эти блоки контролируют работу всех остальных узлов инвертора, обеспечивая его стабильную работу.

Такой жесткий контроль над током и напряжением позволяет получать самые разнообразные его характеристики. Поэтому инвертор и можно использовать и как сварочный, что позволяет в зависимости от свариваемого металла или условий сварки устанавливать разнообразные вольтамперные характеристики тока и как источник питания для электролизно-водного генератора.

Новые конструкции ЭВГ полностью адаптированы под инверторные сварочные источники общепромышленного применения.

Наличие высокочастотной составляющей выпрямленного тока должно положительным образом сказываться на КПД процесса электролиза [5]. Осциллограмма тока на выходе инвертора содержит высокочастотную составляющую амплитудой 25В и частотой 50кГц, видна на экране осциллографа на Рис 10.



Рис. 10. Осциллограмма тока питания электролизера

Вольт – амперные характеристики ЭВГ при температурах электролита в диапазоне 32-37°С показаны на Рис.11. При температуре электролита выше 34°С падения напряжения на ячейках ЭВГ стабилизируются.

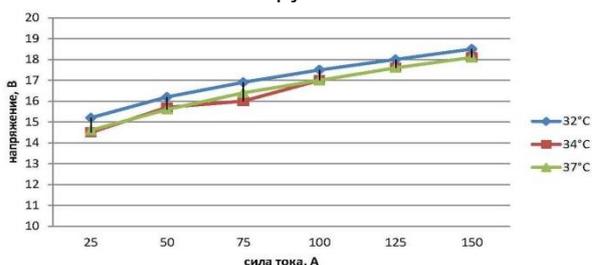


Рис. 11. Вольт – амперная характеристика ЭВГ

На разных режимах определялась производительность ЭВГ по газу, с этой целью использован газовый счетчик. Характеристики энергетической эффективности показаны на Рис. 12.

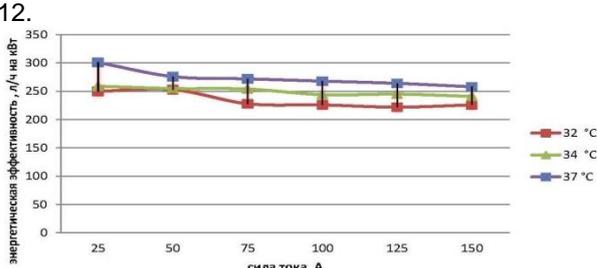


Рис. 12. Энергетическая эффективность – сила тока

Наличие большого разнообразия в типоразмерах выпускаемых промышленностью щелочных аккумуляторов позволяет решать задачу по оптимизации массогабаритных характеристик ЭВГ с их энергетическими показателями.

Для оценки возможности производства опытной партии аппаратов ЭВГ

специализированным предприятием было разработано и изготовлено 3 макета установок из новых щелочных аккумуляторов в пластиковых корпусах максимальной производительностью от 300 до 900 литров водородно-кислородной смеси газов в час.

Конструкции этих установок аналогичны описанным в ранее опубликованных материалах, но исходные новые аккумуляторы производства разных отечественных заводов в различной степени приспособлены для создания из них ЭВГ. Основные проблемы это само качество изготовления корпусов аккумуляторов, недостаточное сечение выводов от электродов (борнов), приспособленность для организации выхода газа и другие.

В процессе «доводки» макетов (Рис.13) при их сборке и апробации в лабораторных условиях были найдены решения по преодолению проблем, возникающих по выше приведенным причинам. Кроме того общая конструкция ЭВГ претерпела некоторые изменения которые нашли отражения в патенте [6].



Рис. 13 ЭВГ производительностью 600 и 900л газовой смеси в час

По данным исследователей температура водородно-кислородного пламени находится в пределах 2100°С - 2800°С и зависит от соотношения объемов кислорода и водорода в смеси (3).

$$\beta = V_{O_2} / V_{H_2} \quad (3)$$

Максимальная температура пламени достигается при соотношении $\beta=0,3$. Так как при электролизе этот показатель $\beta=0,5$, необходима корректировка состава пламени, что и делается при помощи барботера совмещенного с гидрозатвором.

Температура пламени была проверена косвенно при нагреве и расплавлении образца из

молибдена (температура плавления Mo 2620°C)
Рис.14.



Рис. 14. Нагрев образца и его расплавление

Проверка генератора малой производительности (Рис.15) в производственных условиях была проведена на заводе «Металфрио Солюшинз», который работает на мировом рынке торгового холодильного оборудования.

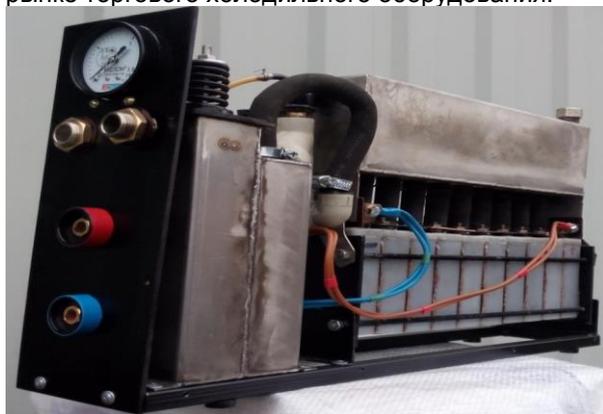


Рис. 15 ЭВГ производительностью 300л газовой смеси в час

Испытания проводились на участке сборки. Работником предприятия в присутствии комиссии была проверена возможность проведения технологического процесса пайки соединений образцов труб применяемых в холодильном агрегате (Рис.16).



Рис.16 Образцы паянных трубок

Проверялась возможность качественного соединения стальных трубок с медными и медных с медными, при этом в качестве припоя использовались припои с разным содержанием серебра. Сравнивались паянные швы полученные нагревом водородно-кислородным пламенем генерируемым с помощью ЭВГ и швы полученные традиционным методом нагревом пропан-кислородным факелом. Качество

соединений получилось соответствующим принятым техническим условиям, и предприятие выразило заинтересованность в приобретении ЭВГ. Также было отмечено отсутствие каких либо запахов, которые присутствуют при использовании сжиженного газа.

Предстоит проведение производственной проверки генераторов среднего и большого типоразмера из планируемой к выпуску линейки.

Результаты исследований

➤ Преимущества ЭВГ по сравнению с баллонами при газопламенной обработке материалов следующие:

1. аппараты взрывобезопасны и при хранении, и при эксплуатации, неработающий ЭВГ безопасен, т.к. это просто конструкция, в которой нечему гореть или взрываться.

2. При работе аппарата газ в нём не накапливается. Производительность аппарата автоматически поддерживается равной расходу газа на горелку. При этом количество водородно-кислородной смеси в аппарате не превышает нескольких литров (в кислородном баллоне – 6000 л, в ацетиленовом – 5500 л). При аварийном взрыве газовой смеси энергия взрыва будет небольшой, а вероятность такого события мала благодаря многоступенчатой защите, предусмотренной в конструкции ЭВГ.

➤ Сварщик не зависит от поставок баллонного газа.

➤ Сварка удешевляется по сравнению с работой от баллонов.

➤ Водородная сварка характеризуется медленным равномерным нагревом металла, это и обуславливает использование ее в сварочном производстве:

- 1. легированных и низкоуглеродистых сталей, толщиной не более 5мм;
- 2. цветных и благородных металлов;
- 3. инструментальных сталей, требующих постепенный нагрев и медленное охлаждение;
- 4. специальных сталей и чугуна, требующих равномерного нагрева всей поверхности;
- 5. пайке резцов и наплавочных работ.

➤ При работе ЭВГ продукт горения – водяной пар, поэтому сварка становится экологически чистой.

➤ Устройство для получения смеси кислорода и водорода изготовлено из кадмий-никелевых щелочных аккумуляторов (в том числе возможно и из отработавших свой ресурс).

➤ ЭВГ отличается высокими энергетическими характеристиками, высокой надежностью и ресурсом работы, а также низкой себестоимостью.

➤ В качестве источника питания ЭВГ использован инверторный источник с возможностью плавной регулировки силы тока. Он оснащен дополнительной опцией, в виде возможности автономного его использования в качестве источника сварочного тока для ручной дуговой сварки штучными электродами. Такое

решение расширяет функциональные возможности устройства в целом.

Устройство пригодно для общепромышленного применения при различных работах, связанных с высокотемпературным нагревом, в том числе - для сварки при ремонтах, в системе жилищно-коммунального хозяйства, для ремонта машин, строительной, сельскохозяйственной техники, в ювелирном деле, при стоматологических работах, при термообработке металлов, и других работах

Выводы

- Спроектирован и изготовлен опытный экземпляр универсального сварочного устройства, которое может использоваться в производственных условиях, в мобильных ремонтных комплексах, в домашних мастерских, в ювелирном и стоматологическом производстве.

Входящее в комплекс устройство для газопламенных работ использует для получения смеси кислорода и водорода кадмий-никелевые щелочные аккумуляторы (в том числе и отработавших свой ресурс). Отличается высокими энергетическими характеристиками, высокой надежностью и ресурсом работы, а также низкой себестоимостью.

Для питания устройства используется один и тот же адаптированный под поставленные задачи инверторный источник тока, который применяется и для ручной дуговой сварки штучными электродами и для питания электролизно-водного генератора. Такое решение расширяет функциональные возможности устройства в целом.

Общие затраты на эксплуатацию одного устройства снижаются до 20 раз в сравнении с традиционной газопламенной обработкой

Литература

- Корж В.Н. Обработка металлов водородно-кислородным пламенем/В.Н.Корж, Ю.С.Попиль. -Киев: Екотехнологія, 2010. - 194 с.
- Патент РФ №2508970 РФ. Устройство для газопламенных работ. / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №7, 2014
- 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
- 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
- Костин Н. А. Импульсный электролиз / Н.А. Костин, В.С. Кублановский, А.В. Заблудовский— Киев: Наук, думка, 1989.—168 с.
- 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

References

- Korzh V.N. Obrabotka metallov vodorodno-kislородnym plamenem [Metal processing of using hydrogen-oxygen flame], Kiev, Ekotehnologija, 2010. 194 p.
- 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
- 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
- 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
- Kostin N. A. Kublanovskij V.S., Zabludovskij A.V. Impul'snyj jelektroliz [Impulsis electrolysis], Kiev, Nauk, dumka, 1989, 168 p.
- 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

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ

УДК 658.262; 658.512:005

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ
ОБЪЕКТОВ ПРИПОРТОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА****Виктор Иванович Гнатюк**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики,
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 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, г. Калининград, ул. Невского, 14
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Дмитрий Владимирович Луценко

кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник технопарка,
Калининградского государственного технического университета
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: lutsenko@bk.ru

Аннотация

Управление электропотреблением для объектов припортового электротехнического комплекса является в настоящее время первостепенной задачей. Однако сложность учёта внешних управляющих воздействий создаёт проблему динамического моделирования управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса. Решить данную проблему предлагается с помощью, предложенной в статье динамической модели управления электропотреблением. Основными этапами моделирования являются: анализ входных данных и периода бифуркации, реализация уточняющих процедур рангового анализа, расчёт добавочного ресурса, а также формирование итоговой ТС-матрицы. Впервые для динамического моделирования электропотребления объектов в модели используется аппарат построения трансформированных ранговых распределения, с помощью которого осуществляется расчёт добавочного ресурса, привнесённого за счёт внешнего управляющего воздействия. Суммарный добавочный ресурс, полученный по результатам уточняющих процедур позволяет существенно уточнить процедуры определения объектов аномально потребляющих электропотребления, прогнозирования, нормирования и потенцирования.

Ключевые слова: динамическая модель, управление электропотреблением, припортовый электротехнический комплекс, добавочный ресурс, ТС-матрица, ранговый анализ, внешнее управляющее воздействие.

**DYNAMIC MODEL OF CONTROLLING ELECTRIC CONSUMPTION
OF OBJECTS OF THE PORTSIDE ELECTROTECHNICAL COMPLEX****Victor I. Gnatyuk**

Dr.Sci.Tech., professor, professor of the department of electrical equipment of vessels and electric power industry,
Kaliningrad State Technical University,
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg R. Kivchun

PhD, associate professor of the Department of Telecommunications of the Institute Physical and mathematical
sciences and information technologies
Immanuel Kant Baltic Federal University
ul. A.Nevskogo 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Dmitry V. Lutsenko

PhD, associate professor, leading researcher Kaliningrad Innovation Center «Technocenosis»
 Kaliningrad State Technical University
 Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
 e-mail: lutsenko@bk.ru

Abstract

The management of electrical energy consumption for objects of the dock-side electrotechnical complex is a high-priority task at the present time. However, the complexity of considering external controlling influences is posing a problem of the dynamic model analysis of management of electrical energy consumption of objects of the dock-side electrotechnical complex. It is proposed to solve this problem through the use of the dynamic model of management of electrical energy consumption which has been suggested in this scientific paper. The basic phases of modelling are the following ones: the analysis of input data and the period of bifurcation, implementation of specifying procedures of the rank analysis, calculation of supplementary resource as well as development of the final matrix. It is the first time when the mechanism of construction of transformed rank distribution is used in the model for the dynamic modelling of electrical energy consumption of objects with the help of which calculation of supplementary resource, which has been imported through external controlling influence, is accomplished. The total amount of supplementary resource, which has been received in the results of specifying procedures, allows clarifying crucially the procedures of identification of objects, which consume electrical energy anonymously, of forecast, normalization and potenshiation.

Key words: dynamic model, management of electrical energy consumption, dock-side electrotechnical complex, supplementary resource, TC-matrix, rank analysis, external controlling influence.

Введение

В статье [1] представлено решение задачи управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса (ПЭК) с помощью методики мониторинга электропотребления. Реализация данной методики успешно осуществлена с помощью ситуационного центра управления электропотреблением.

Методика мониторинга электропотребления объектов ПЭК позволяет довольно хорошо решать задачи управления электропотреблением на небольших горизонтах прогнозирования, однако обладает рядом недостатков, основными из которых являются отсутствие внутренних обратных связей управления и возможности реализации внешних управляющих воздействий. С этой целью методика мониторинга электропотребления объектов ПЭК была дополнена динамической моделью управления электропотреблением [2].

1. Структура динамической модели управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса

Структурно модель включает в себя шесть блоков: формирование внешнего управляющего воздействия, входных данных; моделирования периода бифуркации, реализации уточняющих процедур рангового анализа, расчёта добавочного ресурса и формирования итоговой ТС-матрицы (рис.1).

Исходные данные формируются по результатам стандартных процедур рангового анализа: интервального оценивания, прогнозирования и нормирования. В результате чего, формируется С-матрица, представляющая собой совокупность числовых значений векторов дифлекс-параметра, прогнозных значений и норм,

полученных в результате стандартных процедур рангового анализа и записанных в виде прямоугольной таблицы [2].

На первом этапе модели осуществляется анализ внешнего управляющего воздействия. Ключевыми управляющими воздействия являются организационное воздействие, введение номенклатурных ограничений, ограничение в электроснабжении, повышение точности прогноза электропотребления и стратегическое планирование потребления электроэнергии. Причём, следует обратить внимание на то, что любое воздействие может быть предпринято в различные периоды времени.



Рис. 1. Структура динамической модели управления электропотреблением объектов ПЭК

Для выявления данных периодов во втором блоке модели реализуется процедура моделирования бифуркации. Бифуркация – это особый этап существования объектов ПЭК, на котором устойчивое развитие сменяется неустойчивым состоянием. Вместо одной

инерционной траектории возникают два или несколько новых (в т.ч. бифуркационных) путей возможного устойчивого развития. Выбор между ними определяется малыми воздействиями со стороны систем управления как самого техноценоза, так и внешних (рис. 2).

На основе анализа внешнего управляющего воздействия и полученного в результате процедуры моделирования периода бифуркации электропотребления в четвертом и пятом блоке модели реализуются уточняющие процедуры рангового анализа и рассчитывается добавочный ресурс по электропотреблению.

При применении таких воздействий как номенклатурные ограничения и стратегическое планирование реализуются процедура потенцирования, где рассчитывается добавочный ресурс на основе Z2 и Z3-потенциалов.

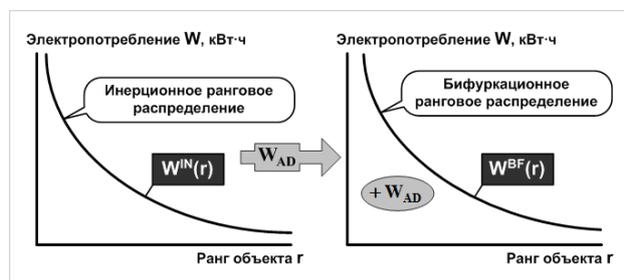


Рис. 2. Инерционное и бифуркационное ранговые распределения по электропотреблению

По мере накопления практического опыта потенцирования на объектах ПЭК возможно использование в процессе нормирования удельных показателей энергоэффективности лучших мировых образцов. Это потребует введение понятия Z3-потенциала, под которым понимается потенциал энергосбережения техноценоза, получаемый после процедуры нормирования. Однако, при этом, пересчет электропотребления объектов внутри функциональных групп осуществляется на основе лучших мировых, а не лучших внутригрупповых, показателей (рис. 3).

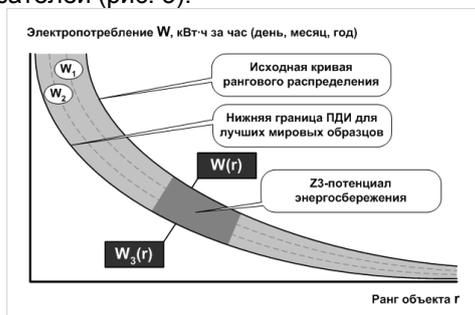


Рис. 3. К понятию Z3-потенциала энергосбережения

Для расчёта Z3-потенциала энергосбережения используется следующее выражение:

$$\Delta W_3 = \int_0^{\infty} W(r) dr - \int_0^{\infty} W_3(r) dr, \quad (1)$$

где $W_3(r)$ – нижняя граница переменного доверительного интервала, полученного для лучших мировых образцов.

Другим этапом процедуры потенцирования является расчёт потенциала энергосбережения с учетом номенклатурных ограничений, возникающих при совместной реализации в едином алгоритме процедур номенклатурной и параметрической оптимизации [1, 2]. В результате чего можно получить Z2-потенциал энергосбережения и соответствующую нижнюю границу доверительного интервала $W_2(r)$ (рис. 4).

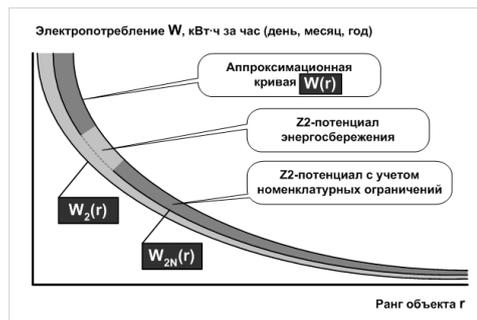


Рис. 4. Потенцирование по электропотреблению с учетом номенклатурных ограничений

Затем на каждом объекте определяется перечень потребителей электроэнергии, которые по тем или иным причинам на данном временном этапе не могут быть подвергнуты модернизации. Далее с использованием процедуры параметрического нормирования по номограммам [3], рассчитываются значения электропотребления объектов с учетом номенклатурных ограничений. Это, в свою очередь, позволяет получить трансформированное ранговое параметрическое распределение по электропотреблению $W_{2N}(r)$, которое также показано на рисунке 4.

Далее реализуется процедура МС-прогнозирования электропотребления объектов техноценоза («МС» – от «MacroCenosis»). МС-прогнозирование – процедура прогнозирования электропотребления объектов техноценоза, предполагающая, с целью уточнения прогноза, использование статистической информации об электропотреблении техноценоза в целом как точки на ранговой параметрической поверхности, построенной для макроценоза. Под макроценозом (МС-ценозом) понимается «материнская» взаимосвязанная совокупность техноценозов более высокого системного уровня, обладающая техноценологическими свойствами, в состав которой входит исследуемый техноценоз как единственный организационно подчиненный «дочерний» объект (МС-объект) (рис. 5).

Прогнозная информация об электропотреблении МС-объекта фактически позволяет с помощью понятия добавочного ресурса получить бифуркационное ранговое параметрическое распределение, когда он рассматривается уже в качестве полноценного техноценоза.

Следующая уточняющая процедура – это режимное нормирование, под которой понимается процедура нормирования электропотребления объектов ПЭК в особых режимах функционирования, характеризующихся планомерным вынужденным снижением электропотребления. Режимы определяются внешними ресурсными ограничениями и, как правило, носят временный характер.

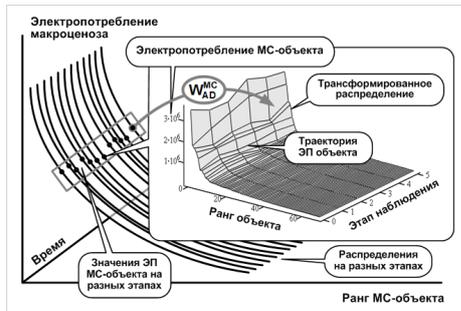


Рис. 5. К понятию МС-прогнозирования

Различают следующие режимы функционирования техноценоза: 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 объектами 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 объектами 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, 4].

Целью режимного нормирования является формирование плана ресурсных ограничений каждого из объектов техноценоза во всех режимах. Исследования здесь производятся с помощью аппарата R-распределений. 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 [2] (рис. 6).

На следующем этапе модели реализуется процедура DC-анализа («DC» – от «DominantCenosis»). DC-анализ – процедура рангового анализа по электропотреблению объектов ПЭК, предполагающая, с целью уточнения, использование статистической информации об электропотреблении доминирующего, иерархически более старшего, технологически определяющего ПЭК. Под доминирующим ПЭК (DC-ценозом) понимается

технологически определяющая поведение зависимого ПЭК взаимосвязанная совокупность объектов, обладающая техноценологическими свойствами [1, 2].

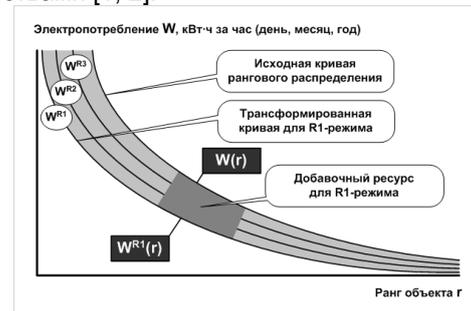


Рис. 6. R-распределения техноценоза

Суть процедуры DC-анализа схематично показана на рисунке 6. В данном случае предполагается, что исходные ранговые параметрические распределения по электропотреблению зависимого и доминирующего техноценозов совпадают (кривая $W(r)$ на рис. 7).

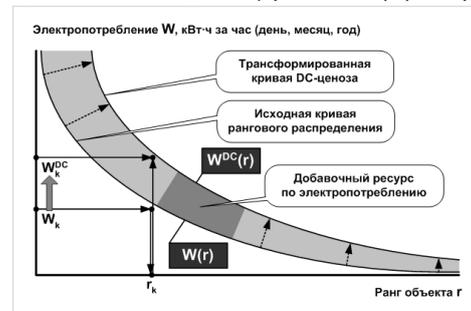


Рис. 7. Суть процедуры DC-анализа

Таким образом, на пятом этапе моделирования, для всех уточняющих процедур, формируется добавочный ресурс по электропотреблению ПЭК:

$$W_{AD} = \begin{cases} W_{AD}^{Z3} = \Delta W_3 = \int_0^{\infty} W(r) dr - \int_0^{\infty} W_3(r) dr; \\ W_{AD}^{2N} = \int_0^{\infty} W_{2N}(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr; \\ W_{AD}^{MC}(\tau) = W_k^{MC}(\tau) - W_k^{MC}(\tau+1); \\ W_{AD}^{R1} = \int_0^{\infty} W(r) dr - \int_0^{\infty} W^{R1}(r) dr; \\ W_{AD}^{DC} = \int_0^{\infty} W^{DC}(r) dr - \int_0^{\infty} W(r) dr, \end{cases} \quad (2)$$

- где
- W_{AD}^{Z3} – добавочный ресурс Z3-потенциала;
 - W_{AD}^{2N} – добавочный ресурс Z2-потенциала;
 - W_{AD}^{MC} – добавочный ресурс техноценоза МС-объекта;
 - W_{AD}^{R1} – добавочный ресурс, рассчитанный для R1-режима;
 - W_{AD}^{DC} – добавочный ресурс техноценоза DC-объекта;

На основе системы (2) на заключительном этапе моделирования формируется ТС-матрица:

$$TC = \begin{pmatrix} W_{11}^{Z3} & W_{12}^{Z3} & \dots & W_{1n}^{Z3} \\ W_{21}^{Zn} & W_{22}^{Zn} & \dots & W_{2n}^{Zn} \\ W_{31}^{MC} & W_{32}^{MC} & \dots & W_{3n}^{MC} \\ W_{41}^{R1} & W_{42}^{R1} & \dots & W_{4n}^{R1} \\ W_{51}^{DC} & W_{52}^{DC} & \dots & W_{5n}^{DC} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ТС-матрица позволяет строить трансформированные ранговые распределения по изменённым данным и на следующий временной шаг.

2. Результаты реализации динамической модели управления электропотреблением ПЭК

Разработанная модель проходила проверку качества полученных результатов на статистических данных по электропотреблению ПЭК Калининградской области. При реализации оценки качества значений уточнённой ТС-матрицы осуществлялась проверка динамики изменения количества аномальных объектов в течение пяти лет. Данная проверка показала, что количество аномальных объектов уменьшается примерно на 10 – 12 %. Произведена проверка качества прогнозных значений по четырём показателям. Первый показатель – количество объектов, относительная ошибка которых больше 5 %, второй – гистограмма относительных ошибок прогноза по всему предприятию за пять лет, третий – максимальная ошибка прогноза по всему предприятию за пять лет, четвёртый - коэффициент вариации, который служит мерой рассеяния прогнозных значений относительно проверочных [1-4]. В результате проверки прогнозных значений за пять лет по первому показателю количество объектов, относительная ошибка прогнозных значений которых больше 5 % составило по одному

объекту в год. При анализе гистограммы второго показателя удалось установить, что частота изменения относительной ошибки прогноза по всему предприятию за пять лет не превысила 7,5 %. Анализ полученной матрицы максимальных ошибок прогноза по всему предприятию за пять контрольных лет показал, что максимальные значения ошибок прогноза не превышают 2,5 %. При рассмотрении полученных коэффициентов вариации удалось установить, что с увеличением шага эвристического анализа, значение коэффициента вариации уменьшается. [1-3].

Оценка качества полученных норм электропотребления по двум показателям. Первый показатель – количество норм, отклоняющихся от нижней границы на величину более 15 %, второй – динамика изменения количества норм, отклоняющихся от нижней границы ПДИ на величину более 15 % [1-4].

В результате расчёта первого показателя определено сорок три объекта, отклонения норм которых превышают 15 % от нижней границы ПДИ. Исследование второго показателя показало, что в течение пяти лет наблюдается уменьшение количества норм, отклоняющихся от нижней границы ПДИ на величину более 15 % примерно на 9-11 % в год [1-3].

Заключение

Таким образом, результаты практической реализации модели на объектах ПЭК Калининградской области показали, что она позволяет существенно уточнить процедуры интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования по электропотреблению, а также соответствующие тонкие дополнения дифлекс-, GZ-, ASR- и ZP-анализа.

Литература

1. Гнатюк В.И., Кивчун О.Р. Интеллектуальные технологии мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3 (37) Т.1. с. 138-135.
2. Киушкина В.Р., Антоненков Д.В. Ранговый анализ распределенных потребителей электроэнергии республики Саха (Якутия) // Промышленная энергетика. Москва. 2013. № 6. с. 12-15.
3. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н. Энергосберегающее управление электропотреблением металлургического предприятия // Главный энергетик. Москва. 2014. № 5. с. 14-23.
4. Andersen F.M. Forecasting hourly electricity load: identification of consumption profiles and segmentation of customers // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 68. P. 244-252.

References

1. Gnatiuk VI, Kivchun OR Intellectual technologies for monitoring the power consumption of the objects of the near-port electrotechnical complex. Marine Intelligent Technologies. 2017. No. 3 (37) T.1. pp. 138-135.
2. Kiushkina V.R., Antonenkov D.V. Rangovyy analiz raspredelennykh potrebitel'ey ehlektro-ehnergii respubliki Sakha (YAkutiya). Promyshlennaya ehnergetika. Moskva. 2013. № 6. pp. 12-15.
3. Nikiforov G.V., Olejnikov V.K., Zaslavets B.I., SHemetov A.N. EHnergosberegayushhee uprav-lenie ehlektropotrebleniem metallurgicheskogo predpriyatiya, Glavnuy ehnergetik. – Moskva. 2014. № 5. – pp. 14-23.
4. Andersen F.M. Forecasting hourly electricity load: identification of consumption profiles and segmentation of customers. Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 68. pp. 244-252.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 658.262; 658.512:005

СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРИПОРТОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ СИСТЕМНОГО И ОБЪЕКТНОГО ПОТЕНЦИАЛОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**Сергей Алексеевич Дорофеев**

кандидат технических наук, научный сотрудник, технопарк
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: dorofeev1973@mail.ru

Олег Романович Кивчун

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций института физико-математических наук и информационных технологий,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. Невского, 14
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Аннотация

В настоящее время на объектах приморских территории уделяется большое внимание вопросам снижения электропотребления. Внедрение новых интеллектуальных технологий управления электропотреблением не в полном объеме позволяет обосновать и конкретизировать величины снижения электропотребления для объектов припортового электротехнического комплекса. В данной статье предлагается один из способов устранения данного недостатка, который заключается в реализации алгоритма снижения электропотребления на основе объектного и системного потенциала энергосбережения. Основными этапами алгоритма являются следующие: формирование исходной базы данных по электропотреблению, анализ заданной стратегии энергосбережения, расчёт объектного потенциала, определение лидинговых параметров для групп объектов, расчёт системного потенциала энергосбережения и оценка эффективности полученных результатов. Данный алгоритм реализован в программно-аппаратном комплексе управления электропотреблением Калининградской области и позволяет индивидуально для каждого объекта с учётом выбранной стратегии определить плановые показатели снижения электропотребления.

Ключевые слова: интеллектуальные технологии, потенциал энергосбережения, припортовый электротехнический комплекс, электропотребление, стратегия энергосбережения.

DECREASE IN ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION IN THE COURSE OF OPERATION OF OBJECTS OF THE DOCK-SIDE ELECTROTECHNICAL COMPLEX BASED ON THE ASSESSMENT OF SYSTEM-WIDE AND FACILITY-LEVEL POTENTIAL OF ENERGY SAVING**Sergey A. Dorofeev**

PhD, leading researcher Kaliningrad Innovation Center «Technocenosis»
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: dorofeev1973@mail.ru

Oleg R. Kivchun

PhD, associate professor of the Department of Telecommunications of the Institute Physical and mathematical sciences and information technologies
Immanuel Kant Baltic Federal University
ul. A.Nevskogo 14, Kaliningrad, 236016, Russian Federation
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Abstract

At the present day a lot of attention is devoted to issues of reducing electrical energy consumption in the seaside facilities. The implementation of new-fangled intelligent technologies of management of

electrical energy consumption not to the fullest extent enables us to substantiate and elaborate quantities of reduction of electrical energy consumption for the facilities of dock-side electrotechnical complex. This scientific paper suggests a variant of this drawback elimination which implies the realization of the algorithm of reduction of electrical energy consumption based on facility- and system-level potential of electrical power saving. The basic stages of the algorithm are the following: development of current database on electrical energy consumption, analysis of the established strategy of electrical power saving, calculation of the facility-level potential, identification of leading parameters for groups of facilities, calculation of system-level potential of electrical power saving and assessment of efficiency of achieved outcomes. This algorithm is implemented in hardware and software complex of management of electrical energy consumption in Kaliningrad region and enables to determine the targeted indexes of reduction of electrical energy consumption individually for each facility considering the chosen strategy.

Keywords: intelligent technologies, potential of electrical power saving, dock-side electrotechnical complex, electrical energy consumption, strategy of electrical power saving.

Введение

Анализ мировых тенденций развития электроэнергетической отрасли демонстрирует, что в ближайшие годы она столкнется с такими вызовами как моральное устаревание инфраструктуры и необходимость интеграции новых интеллектуальных технологий [1, 2].

В перспективе до 2020 года будет происходить постепенный переход к новому типу организации электрической сети – «Smart Grid» [1] (рис. 1).

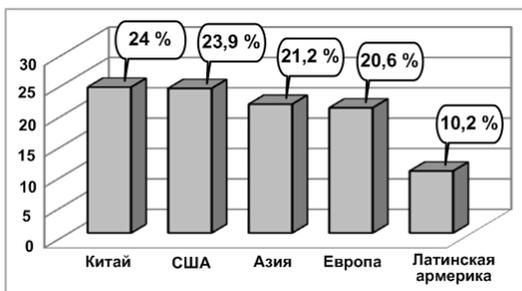


Рис. 1. Прогноз глобального рынка «Smart Grid» к 2020 году

С 2013 года развитие глобального рынка «Smart Grid» вступило в фазу активного практического обсуждения конкретных преимуществ энергокомпаний и конечных потребителей от внедрения технологий «Smart Grid», новых возможностей, возникающих благодаря развитию сетевой инфраструктуры, включая развитие возобновляемой энергетики и электрического транспорта [1]. Сформировался комплекс подходов, отражающих комплексный характер создания и функционирования интеллектуальной энергетики на приморских территориях России. Несомненно, данный вид организации будет однозначно внедряться на объектах припортовых электротехнических комплексов (ПЭК) России [1, 2].

Кроме того в настоящее время существует большое количество программно-аппаратных комплексов, которые предназначены для обработки данных по электропотреблению, полученных с помощью технологий «Smart Grid». В результате анализа ПЭК России установлено, что таких комплексов у каждого из них более тридцати.

Однако, данные комплексы позволяют решать только задачу сбора и учёта данных по

электропотреблению. Интеллектуальная обработка данных с реализацией научно обоснованных алгоритмов и моделей в настоящее время не достаточно совершенна. С этой точки зрения в статье предлагается научно обоснованный подход к снижению электропотребления объектов ПЭК на основе алгоритма расчёта системного и объектного потенциалов энергосбережения, который реализован в программно-аппаратном комплексе управления электропотреблением Калининградской области.

1. Алгоритм снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе системного и объектного потенциалов энергосбережения

В работе [3] авторами рассмотрен подход к определению величины потенциала энергосбережения припортового электротехнического комплекса на основе процедуры потенцирования.

В настоящее время большое внимание в указах и распоряжениях правительства Российской Федерации уделяется вопросам снижения электропотребления. В том числе, данный вопрос остро стоит для приморских территорий.

Внедрение новых интеллектуальных технологий не в полном объёме позволяет обосновать и конкретизировать величины снижения электропотребления для объектов ПЭК.

Для устранения данного недостатка разработан алгоритм снижения электропотребления на основе объектного и системного потенциала энергосбережения, который позволяет индивидуально для каждого объекта с учётом выбранной стратегии определить плановые показатели снижения электропотребления (рис. 2).

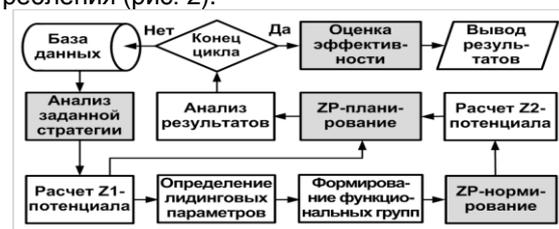


Рис. 2. Алгоритм снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса

Первоначально алгоритмом предусмотрен анализ выбранной стратегии, в основе которой заложено достижения к заданному временному интервалу требуемого уровня снижения электропотребления:

$$\Delta Z = \frac{K^{PL} \cdot \sum_{k=1}^N W_k}{100 \cdot T}, \quad (1)$$

где K^{PL} – плановый коэффициент – задаваемая в процентах норма снижения электропотребления;
 T – время реализации планового коэффициента, задаваемое в количестве временных интервалов, за которые должна быть достигнута заложенная норма.

Данный показатель позволяет оценить инвестиционные перспективы и управленческие возможности исследуемого объекта [3-5].

Следующий этап – расчёт Z1-потенциала энергосбережения, под которым понимается величина снижения электропотребления, рассчитанная как абсолютная разница между электропотреблением техноценоза (в кВт·ч) за год и электропотреблением, соответствующим нижней границе ПДИ (рис. 3).

При этом, ПДИ строится за расчётный промежуток времени, ограниченный глубиной база данных по электропотреблению. Нижняя граница ПДИ определяет минимальное электропотребление объектов, до которого возможно снижение за счёт организационных и управленческих решений направленных на энергосбережение.

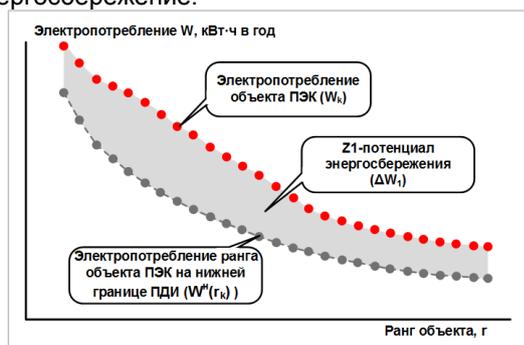


Рис. 3. Z1-потенциал энергосбережения (системный)

Расчёт Z1-потенциала осуществляется по выражению [2]:

$$\Delta W_1 = \sum_{k=1}^{k_{max}} W_k - \sum_{r=1}^{r_{max}} W^H(r_k). \quad (2)$$

Далее осуществляется подготовительный этап к процедуре ZP-нормирование, который включает определение лидинговых параметров объектов, по значению которых эти объекты объединяются в функциональные группы. Лидинговый параметр характеризует основное общее свойство объектов входящих в одну группу, т.е. функциональное

предназначения и однотипность решаемых задач [3, 5]. В качестве примера лидингового параметра для группы объектов складских помещений морского торгового порта будет являться объём хранилищ в условных вагонах. Для каждого ПЭК количество групп объектов и значения их лидинговых параметров определяется индивидуально.

Процедура ZP-нормирование заключается в пересчёте электропотребления объектов функциональных групп на основе лучшего внутригруппового удельного электропотребления к значению лидингового параметра.

Таким образом, сравнивая удельное электропотребление объектов внутри группы, выбирая наименьшее его значение и пересчитывая по нему электропотребление других объектов группы, учитываются лучшие технологические и организационные решения доступные для техноценоза. Полученные значения ZP-норм электропотребления объектов позволяют построить новые ранговые распределения и ПДИ к ним, а затем рассчитать Z2-потенциал энергосбережения.

Расчёт Z2-потенциала энергосбережения, осуществляется как абсолютная разница между электропотреблением техноценоза (в кВт·ч) за год исследования и электропотреблением, соответствующим нижней границе ZP-интервала (рис. 4), полученной в результате интервального оценивания после ZP-нормирования [4].

Нижняя граница ZP-интервала определяет минимальное электропотребление объектов, до которого возможно снижение за счёт технологических и управленческих решений доступных на данном временном интервале направленных на энергосбережение.

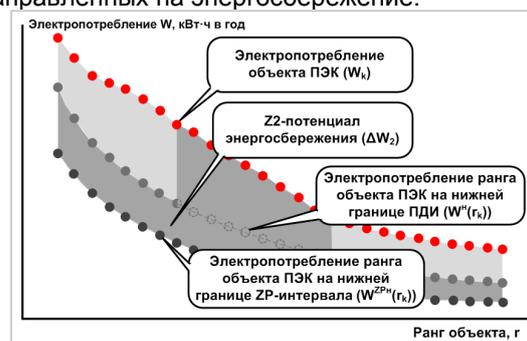


Рис. 4. Z2-потенциал энергосбережения (объектный)

Расчёт Z2-потенциала осуществляется по выражению [3-5]:

$$\Delta W_2 = \sum_{k=1}^{k_{max}} W_k - \sum_{r=1}^{r_{max}} W^{ZPH}(r_k). \quad (3)$$

Одним из основных этапов является расчёт плановых показателей снижения электропотребления, который осуществляется в рамках процедуры ZP-планирование и предусматривает определение для каждого объекта

индивидуальных норм и количество временных интервалов снижения электропотребления для реализации Z1- и Z2-потенциалов энергосбережения. Для этого на основе выбранной стратегии энергосбережения первоначально определяется индивидуальная норма снижения электропотребления каждого объекта на единичном временном интервале:

$$\Delta W_k^{PL} = \frac{W(r_k) \cdot \Delta W^{PL}}{\sum_{k=1}^{k_{max}} W_k} \quad (4)$$

где ΔW^{PL} – величина, на которую в течение каждого временного интервала должно снижаться суммарное электропотребление;
 $W(r_k)$ – текущее значение электропотребления k-го объекта;
 $\sum_{k=1}^{k_{max}} W_k$ – сумма эмпирических значений электропотребления объектов на начальном этапе снижения электропотребления.

Количество временных интервалов снижения электропотребления для объектов определяется как отношение величины потенциала энергосбережения и индивидуальной нормы снижения.

По результатам анализа рассчитанных показателей принимается решение об оценке эффективности снижения электропотребления сопоставлением двух интегральных показателей, один из которых характеризует положительный эффект, а второй – затраты. Положительный эффект от внедрения методологии оптимального управления электро- потреблением оценивается интегральным показателем вида [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} IP_W^* &= \left(\int_0^\infty W(r)dr - \int_0^\infty W^*(r)dr \right) / \int_0^\infty W(r)dr; \\ IP_W^t &= \left(\int_0^\infty W(r)dr - \int_0^\infty W^t(r)dr \right) / \int_0^\infty W(r)dr, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где IP_W^* – целевой интегральный показатель, определяемый на основе Z1- или Z2-потенциала;
 IP_W^t – текущий интегральный показатель качества, определяемый на t-ом временном интервале;
 $W(r)$ – аппроксимационная кривая для эмпирических значений электропотребления объектов;
 $W^*(r)$ – нижняя граница ПДИ по итогам ZP-нормирования;
 $W^t(r)$ – аппроксимационная кривая для модельных значений электропотребления объектов на t-ом временном интервале.

Результирующий интегральный показатель определяется:

$$IP_W = \frac{IP_W^t}{IP_W^*} \quad (6)$$

Затраты от внедрения алгоритма снижения электропотребления оцениваются интегральным показателем:

$$IP_C = 1 + \frac{\int_0^\infty C^t(r)dr}{\int_0^\infty (W(r) \cdot sc(r))dr - \int_0^\infty W^*(r) \cdot sc^*(r)dr} \quad (7)$$

где $C^t(r)$ – ранговое параметрическое распределение объектов по совокупным затратам на энергосбережение на t-ом временном интервале;
 $sc(r)$ – ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, предъявляемого объектам на начальном временном интервале;
 $sc^*(r)$ – ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, на временном интервале, в котором достигается Z-потенциал.

Критерием эффективности процесса оптимального управления электропотреблением объектов является максимизация интегрального показателя эффективности:

$$IP = \frac{IP_W}{IP_C} \rightarrow max. \quad (8)$$

Формально интегральный показатель эффективности исчисляется в диапазоне [0, 1], левая часть которого соответствует полному отсутствию управляющих процедур направленных на энергосбережение, а правая соответствует критериальному значению.

2. Результаты расчёта системного и объектного потенциалов энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса

Количественная оценка результатов расчёта системного и объектного потенциалов энергосбережения осуществлялась в программно-аппаратном комплексе управления электропотреблением Калининградской области для объектов ПЭК [5] (рис. 5).

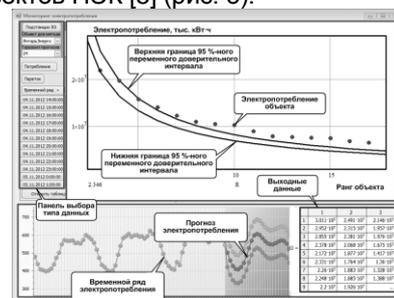


Рис. 5. Рабочее место расчёта потенциала энергосбережения

В качестве исходных данных была использована информация об электропотреблении объектов ПЭК с 2013 по 2016 год.

Таким образом, в результате реализации предложенного алгоритма получены следующие плановые показатели снижения электропотребления: системный потенциал составил около 15,2 % от общего электропотребления ПЭК, объектный потенциал – около 29,4 %, были рассчитаны индивидуальные нормы каждого объекта и количество временных интервалов снижения электропотребления для реализации Z1- и Z2- потенциалов, которые составили от 5 до 8 лет.

Заключение

Таким образом, в работе авторами предложен алгоритм снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе системного и объектного потенциалов энергосбережения с реализацией в программно-аппаратном комплексе управления электро-потреблением с интеллектуальной обработкой данных.

Применение вышеуказанного алгоритма на объектах ПЭК позволит повысить качество управления электропотреблением и соответственно снизить затраты за счёт повышения эффективности расхода электроэнергии и реализации потенциала энергосбережения.

Литература

1. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 года. – М.: – 2016. – 341 с.
2. Гнатюк В.И., Дорофеев С.А., Кивчун О.Р. Методика управления электропотреблением при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса Калининградской области на основе системных свойств потенциала энергосбережения // Промышленная энергетика. – 2017. – № 10. – с. 58-65.
3. Гнатюк В.И., Яфасов А.Я., Кивчун О.Р. и др. Фральцов. Определение потенциала энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса в рамках развития интеллектуальных энергетических систем // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Том № 1, Вып. № 37. – С. 142-149.
4. Разработка методики мониторинга электропотребления регионального электротехнического комплекса дочерней компании Холдинга МРСК (на примере ОАО «Янтарьэнерго»): отчёт о НИР / испол.: А.А. Меркулов, С.А. Дорофеев, О.Р. Кивчун [и др.] шифр «Монитор». – Калининград: Техноценоз, 2012. – Инв. № 45 / 3.1 / 970 от 25.06.2012 г.
5. Кошарная Ю.В. Разработка системы нормирования показателей потребления энергии и оценки объемов энергосбережения на примере металлургического предприятия // Промышленная энергетика. – М.: – 2015. – № 8. – с. 13-22.

References

1. Programma innovacionnogo razvitiya PAO «Rosseti» na period 2016-2020 gg. s perspektivoj do 2025 goda. M. 2016. P. 341.
2. Gnatyuk V.I., Dorofeev S.A., Kivchun O.R. Metodika upravleniya ehlektropotrebleniem pri ehkspluatatsii ob"ektov regional'nogo ehlektrotekhnicheskogo kompleksa Kaliningradskoj oblasti na osnove sistemnykh svojstv potentsiala ehnergoberezheniya. Promyshlennaya ehnergetika. 2017. № 10. pp. 58-65.
2. Gnatyuk V.I., Yafasov A.YA., Kivchun O.R. i dr. Fral'tsov. Opredelenie potentsiala ehnergoberezheniya ob"ektov priportovogo ehlektrotekhnicheskogo kompleksa v ramkakh razvitiya intellektual'nykh ehnergeticheskikh system. Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2017. Tom № 1, Vyp. № 37. pp. 142-149.
3. Razrabotka metodiki monitoringa ehlektropotrebleniya regional'nogo ehlektrotekhnicheskogo kompleksa dochernej kompanii KHoldinga MRSK (na primere OAO «YAntar'ehnergo»): otchyot o NIR. ispol.: A.A. Merkulov, S.A. Dorofeev, O.R. Kivchun [i dr.] shifr «Monitor». Kaliningrad: Tekhnotsenoz, 2012. Inv. № 45 Z.1.970 ot 25.06.2012 g.
4. Kosharnaya YU.V. Razrabotka sistemy normirovaniya pokazatelej potrebleniya ehnergii i otsenki ob'emov ehnergoberezheniya na primere metallurgicheskogo predpriyatiya. Promyshlennaya ehnergetika. M: 2015. № 8. pp. 13-22.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 658.263 + 303.725.2

**ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНАТОРНОЙ ТЕОРИИ РАНГОВОЙ
ДИНАМИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПРИПОРТОВОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА**

Дмитрий Владимирович Луценко

кандидат технических наук, научный сотрудник технопарка
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: lutsenko@bk.ru

Аннотация

Современный припортовый региональный электротехнический комплекс является техноценозом. Для управления его электропотреблением разработана методика, представляющая собой взаимосвязанную совокупность процедур рангового анализа: интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование и потенцирование. Процесс электропотребления техноценоза в данных процедурах представляется в виде последовательности ранговых параметрических распределений. Многими учеными отмечалось, что объекты вместе с электропотреблением также изменяют своё положение, фиксируемое величиной ранга. Это явление, названное ранговая динамика, не нашло должного теоретического обоснования в прикладных процедурах управления. Предложено рассматривать отдельные результаты ранжирования, раскрывающие дискретные свойства ранговых распределений, как комбинаторные конфигурации. Это позволило привлечь к исследованию ранговой динамики теорию множеств, теорию графов, методы комбинаторного анализа и комбинаторной оптимизации. В результате этого в ранговом анализе сформировался самостоятельный раздел, названный комбинаторная теория ранговой динамики, позволивший учесть в прикладных процедурах явление ранговой динамики.

Ключевые слова: ранговое распределение, процедуры рангового анализа, электропотребление, ранговая конфигурация, ранговая структура, граф, подстановка, задача о назначениях.

**BASES OF APPLICATION OF THE COMBINATORY THEORY OF RANKED
DYNAMICS IN THE RESEARCH OF THE FUNCTIONING OF THE REGIONAL
ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF MARINE PORT**

Dmitry V. Lutsenko

PhD, scientific employee of technopark
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: lutsenko@bk.ru

Abstract

The modern regional electrical engineering complex of marine port is a technocoenosis. To control its power consumption, a technique is developed that is an interrelated set of procedures for rank analysis: interval estimation, forecasting, rationing and potentiation. The process of power consumption of a technocoenosis in these procedures in the form of a sequence of rank parametric distributions. Many scientists noted that objects along with power consumption also change their position, fixed by the value of the rank. This phenomenon, called rank dynamics, did not find proper theoretical justification in applied management procedures. It is suggested to consider individual ranking results that disclose the discrete properties of rank distributions, as combinatorial configurations. This allowed us to attract the theory of sets, graph theory, combinatorial analysis and combinatorial optimization methods to the study of rank dynamics. As a result, in the rank analysis, an independent section was formed, called the combinatorial theory of rank dynamics, which allowed for taking into account in

applied procedures phenomenon of rank dynamics.

Key words: rank distribution, rank analysis procedures, power consumption, rank configuration, rank structure, graph, substitution, task of destination.

Введение

На современном этапе под припортовым региональным электротехническим комплексом понимается ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, инфраструктурно функционирующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения. Наличие техноценологических свойств обуславливает применение рангового анализа как основного метода исследования систем подобного типа [1,2,3]. В частности, для управления электропотреблением в ранговом анализе разработаны процедуры интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенцирования, объединённые в единую методику (рис. 1) [2].

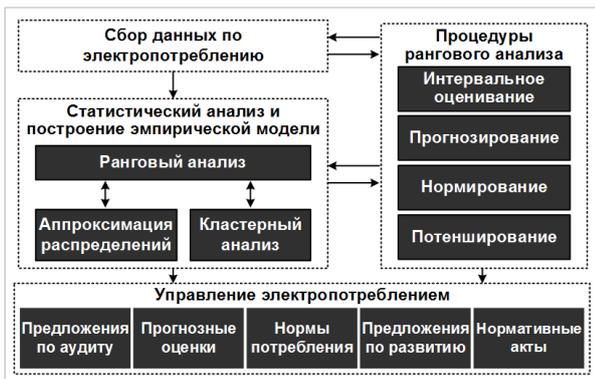


Рис. 1. Методика оптимального управления электропотреблением

Электропотребление техноценоза в ранговом анализе рассматривается как последовательный процесс изменения его состояний, каждое из которых суть ранговое параметрическое распределение, полученное в определенный момент времени. Многими учёными отмечалось, что объекты техноценоза кроме электропотребления меняют также своё положение, выраженное величиной ранга [2,3]. Однако должного теоретического обоснования данное явление не находило, а в прикладных методиках принято предположение о неизменности рангов. Понимание двойственности рангового распределения, прежде всего его дискретных свойств, позволило автору сформировать основные понятия, принципы и подходы к исследованию ранговой динамики, оформленные в самостоятельный раздел рангового анализа – комбинаторную теорию ранговой динамики.

1. Основные понятия и определения

В рассматриваемой теории исходной является посылка о различимости объектов по величине

исследуемого параметра. Её принятие исключает неопределенность при ранговом размещении объектов, в результате которого строится ранговое параметрическое распределение. Отдельным результатом ранжирования следует считать взаимно-однозначное отображение, связывающее множество рангов и множество объектов и называемое ранговым. Формально оно определяется на основе следующих выражений:

$$I, R \subseteq \overline{\{1, n\}}; y: I \rightarrow W; \pi: I \rightarrow R; f: R \rightarrow W; y = \pi \circ f, \tag{1}$$

где W – конечное множество значений непрерывного параметра; $\overline{\{1, n\}}$ – множество натуральных чисел $1, 2, \dots, n$; n – количество объектов; I – множество объектов; R – множество рангов. В ранговом анализе отображение $f: R \rightarrow W$ приближается к зависимости вида:

$$w(r) = \frac{W_1}{r^\beta}, \tag{2}$$

где W_1, β – параметры рангового распределения.

Учитывая, что $I, R \subseteq \overline{\{1, n\}}$, то результат ранжирования есть отображение множества объектов на себя, называемое подстановкой [4]. При этом для подстановки π в (1) определитель суть объекты, а результат – ранги.

Обозначим ранговое параметрическое распределение вектором $W_r = \|w_r\|_{r=1}^n$, тогда процесс электропотребления техноценоза можно представить последовательностями векторных величин:

$$W(t) = [W_t]_{t=1}^T; W_r(t) = [W_{rt}]_{t=1}^T; \pi(t) = [\pi_t]_{t=1}^T, \tag{3}$$

где W_t – вектор данных по электропотреблению; W_{rt} – ранговое параметрическое распределение по электропотреблению; π_t – ранговое отображение; t – время; T – длина последовательности.

Согласно структурно-топологической динамики, устойчивость во времени рангового параметрического распределения задает его прогнозируемость (рис. 2) [3]. Применительно к ранговым конфигурациям устойчивость характеризуется упорядоченностью. Упорядоченность – способность техноценоза сохранять в процессе функционирования порядок, проявляющийся в свойствах ранговых конфигураций и структур.

Для последовательности $\pi(t)$ рассмотрим действия левого и правого умножения:

$$\sigma_t = \pi_{(t-1)}^{-1} \circ \pi_t; s_t = \pi_{(t-1)} \circ \pi_t^{-1}, \tag{4}$$

в результате пошагового выполнения которых для каждого $t = 2, \dots, T$ формируются последовательности $\sigma(t) = [\sigma_t]_{t=1}^{T-1}$ и $s(t) = [s_t]_{t=1}^{T-1}$ (рис. 3, 4). Для иллюстрации отличия множества объектов I от множества рангов R первое задано латинскими буквами, хотя на практике $I, R \subseteq \{1, n\}$.

По своей природе σ, s являются подстановками. В подстановке σ , называемой

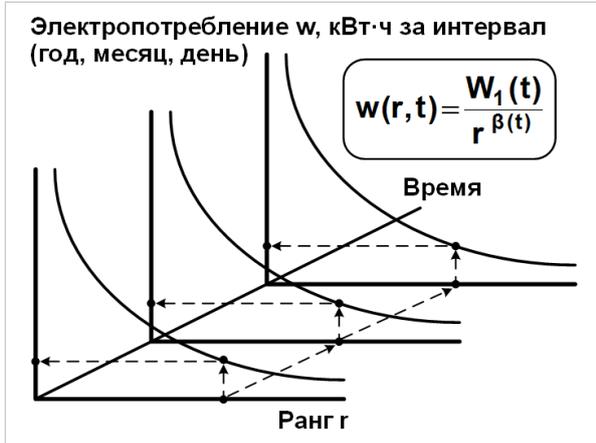


Рис. 2. Устойчивость ранговых распределений

сдвиговым ранговым отображением, определитель суть ранги на предыдущем временном интервале, а результат – ранги в последующем. Свойства каждой подстановки σ_t в последовательности $\sigma(t)$ целостно отражают ранговую динамику при последовательном переходе техноценоза из одного состояния в другое.

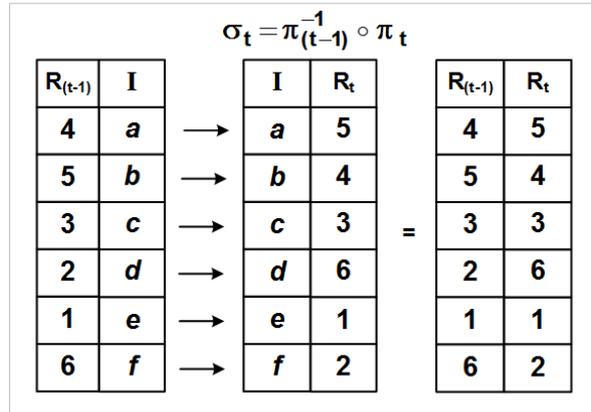


Рис. 3. Левое умножение

Определитель и результат подстановки s , называемой ранговой, суть номера объектов техноценоза. Свойства каждой подстановки s_t в последовательности $s(t)$ отражают ранговые связи между объектами при занятии ими в последовательные моменты времени одинаковых рангов. Рассмотренные ранговое отображение π , сдвиговое ранговое отображение σ , ранговая подстановка s объединяются общим понятием ранговая конфигурация, под которой понимается

комбинаторная конфигурация, получаемая в результате комбинаторного представления результатов ранжирования.

Представим $\pi(t)$ в виде последовательности подстановочных матриц

$$\Pi(t) = [\Pi_t]_{t=1}^T; \Pi_t = \|\pi_{i,j}\|_{i,j}^n; \pi_{i,j} = \begin{cases} 1, & \pi_t(i) = j; \\ 0, & \pi_t(i) \neq j, \end{cases} \quad (5)$$

для которой выполним следующие действия:

$$B = \bigvee_{t=1}^T \Pi_t; P = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Pi_t, \quad (6)$$

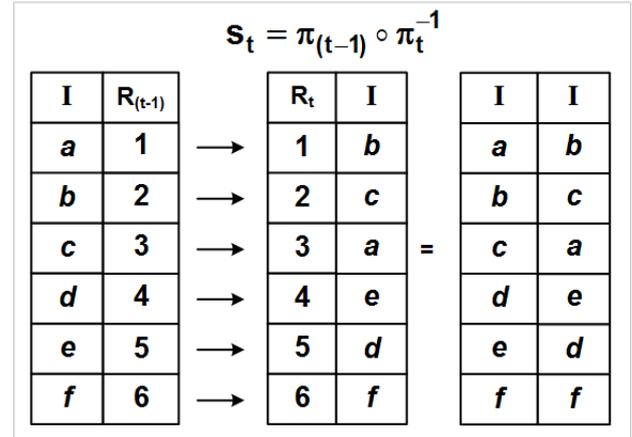


Рис. 4. Правое умножение

где \bigvee – операция логического суммирования. Булева матрица B есть матрица смежности двудольного графа (рис. 5) $G^{(\pi)} = (X \cup Y, E)$ $X \cap Y = \emptyset$, в котором множество вершин левой доли X суть номера объектов, множество вершин правой доли Y суть ранги, дуга графа $e = (i, j)$ $e \in E$ соответствует паре индексов ненулевого элемента $b_{i,j}$ [4].

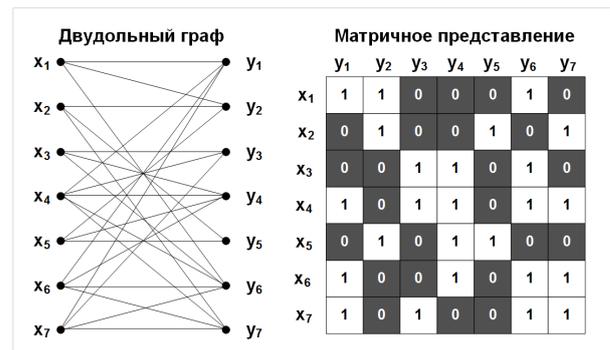


Рис. 5. Двудольный граф последовательности $\pi(t)$

Свойства графа $G^{(\pi)}$ отражают связи между множествами объектов I и рангов R , получаемые при последовательном ранжировании. Аналогичным образом по (5), (6) для последовательности $\sigma(t)$ можно построить двудольный граф $G^{(\sigma)}$, в котором X суть ранги на предыдущем и Y ранги на последующем

временных интервалах. Граф $G^{(\sigma)}$ отражает связи между рангами, которые занимались одинаковыми объектами в процессе функционирования техноценоза. Так как в ранговой подстановке s определитель и результат имеют одну интерпретацию – это объекты (рис. 4), то граф $G^{(s)} = (V, E)$, полученный на основе $s(t)$, является ориентированным. Множество вершин V графа $G^{(s)}$ есть множество объектов техноценоза, а множество рёбер E характеризует ранговые связи между объектами при занятии ими в последовательные моменты времени одинаковых рангов. На основании того, что в прикладных процедурах не представляет интерес порядок смены объектов в ранге, ориентированный граф $G^{(s)}$ преобразуется неориентированный (undirected) граф $G_U^{(s)}$, в котором фиксируется не направленность ранговой связи, а факт её существования. Графы $G^{(\pi)}$, $G^{(\sigma)}$, $G_U^{(s)}$ объединяются понятием ранговая структура, под которой понимается комбинаторный объект, получаемый путём преобразования последовательности ранговых конфигураций в многозначное отображение.

Таким образом, в комбинаторной теории ранговой динамики структурные свойства техноценоза, характеризующие упорядоченность его электропотребления изучаются с использованием дискретных объектов, объединённых понятиями ранговая конфигурация и ранговая структура.

3. Прикладное применение комбинаторной теории ранговой динамики

Рассмотрим матрицу $P = \| \| p_{i,j} \| \|_{i,j=1}^n$ (7), элемент которой представляет собой относительную частоту события, характеризующегося упорядоченной парой (i, j) . Для $\pi(t)$ данное событие заключается в занятии при ранжировании i -ым объектом j -го ранга, для $\sigma(t)$ – в занятии одним и тем же объектом в последовательные моменты времени ранга раннего сначала i , затем j . Будем рассматривать матрицу P как таблицу в задаче о назначениях, в которой строки суть работники, столбцы суть работы, а отдельный элемент таблицы – эффективность, с которой работник может выполнять определенную работу [4]. Если элемент таблицы равен 0, то у работника нет квалификации выполнять соответствующую работу. Необходимо так расставить работников на работы, чтобы, ни одна работа не выполнялась дважды, сотрудник не выполнял две работы, а общая эффективность выполнения работ была максимальной. Решение данной задачи есть паросочетание, являющееся, в свою

очередь, подстановкой. Применительно к матрице P суть решения задачи о назначениях заключается в поиске паросочетания, обладающего максимальной вероятностной мерой:

$$S_{\max} = \operatorname{argmax}_{s \in S_n} \sum_{i=1}^n p_{i,s(i)}, \quad (8)$$

где S_n – множество $n!$ подстановок степени n .

Алгоритм решения задачи о назначениях состоит в последовательном выполнении ряда шагов [4]: а) построение нормализованной таблицы назначений; б) построение двудольного графа в) поиск максимального паросочетания. В случае, если мощность паросочетания не равняется количеству объектов n , то осуществляется выделение минимальной опоры, выполняется перестановка нулей в нормализованной таблице назначений и алгоритм снова переходит на шаг б).

Для поиска максимального паросочетания используется алгоритм Хопкрофта-Карпа [5], совмещенный с поиском в ширину [6]. В данном алгоритме дуги паросочетания называют сильными, остальные дуги – слабыми. Вершину, инцидентную сильной дуге, называют насыщенной, в противном случае – ненасыщенной. Алгоритм Хопкрофта-Карпа строится на поиске добавляющих маршрутов [5]. Добавляющим считается маршрут, который начинается и заканчивается в ненасыщенных вершинах, а максимальным такое паросочетание, относительно которого нельзя построить добавляющий маршрут (рис. 6).

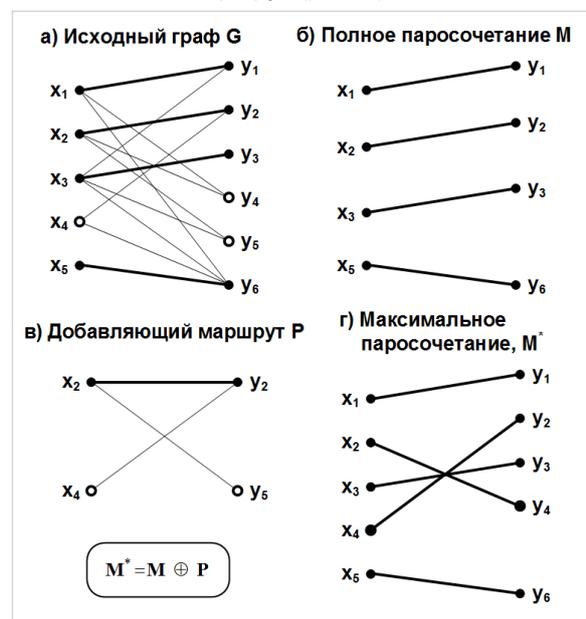


Рис. 6. Поиск максимального паросочетания

Поиск добавляющего маршрута осуществляется на основе модифицированного поиска в ширину [6]. Его суть состоит в построении дерева достижимости T для ненасыщенной вершины x . Произвольная ненасыщенная вершина

у называется четной или нечетной в зависимости от того, четно или нечетно расстояние между нею и вершиной x . Для чётных вершин исследуются инцидентные им слабые дуги, а для нечётных – сильные. Если обнаруживается чётная ненасыщенная вершина, то путь до неё в T есть добавляющий маршрут.

Решением задачи о назначениях применительно к матрице $P^{(\pi)}$, полученной по $\pi(t)$, является модельное ранговое отображение $\hat{\pi}$, а для матрицы $P^{(\sigma)}$, полученной по $\sigma(t)$ – модельное сдвиговое ранговое отображение $\hat{\sigma}$.

Одной из процедур рангового анализа является интервальное оценивание (рис. 1), в которой строится переменный доверительный интервал. Особый интерес представляет его нижняя граница, определяющая минимально возможное электропотребление при выполнении всех возложенных на техноценоз задач (рис. 7).



Рис. 7. Переменный доверительный интервал

Ранговое распределение, являясь системной характеристикой, не содержит никакой информации об объектах. Для корректного сопоставления системных величин с объектами выполняется проекция ранговых оценок:

$$1 \leq i, r \leq n; w_{H_i} = w_H(\hat{\pi}(i)); w_H(r) = \frac{W_1}{r^\beta}, \quad (9)$$

где w_{H_i} – электропотребление i -го объекта на нижней границе переменного доверительного интервала (рис. 7); $\hat{\pi}$ – модельное ранговое отображение; W_1, β – параметры рангового распределения, n – количество объектов.

Модельное сдвиговое ранговое отображение $\hat{\sigma}$, являющееся оператором перехода для последовательности $\pi(t)$, находит применение в процедуре прогнозирования:

$$\begin{cases} \pi_{(T+1)} = \pi_{T \circ \hat{\sigma}}; \\ w(i, T+1) = \frac{W_1(T+1)}{(\pi_{(T+1)}(i))^{\beta(T+1)}}, \end{cases} \quad (10)$$

где $w(i, T+1)$ – прогноз электропотребления i -го объекта; $\hat{\sigma}$ – модельное сдвиговое ранговое отображение; $\pi_{(T+1)}(i)$ – ранг i -го объекта в отображении $\pi_{(T+1)}$; $W_1(T+1), \beta(T+1)$ – прогнозные параметры рангового распределения; T – момент прогнозирования.

Целью процедуры нормирования (рис. 1) является выделение на ранговом параметрическом распределении групп объектов, потребляющих электроэнергию сходным образом. Для данных групп разрабатываются нормы электропотребления. Здесь применяются методы кластерного анализа, использующие по своей сути критерии максимизации межкластерного разброса при минимизации суммарного внутрикластерного. При этом нет возможности априорно определить необходимое количество кластеров, а соответствующие нормы получаются на основе одного, как правило, последнего известного рангового параметрического распределения. Предлагается это противоречие решить задачей о раскраске графа $G_U^{(s)}$.

Пусть граф $G_U^{(s)} = (V, E)$ отражает факты ранговой связанности объектов. Рассмотрим дополнительный граф $\bar{G}_U^{(s)} = (V, \bar{E})$, в котором \bar{E} есть дополнение множества E . Тогда хроматическое число χ графа $\bar{G}_U^{(s)}$ определит минимальное количество групп объектов таких, что внутри группы любые два объекта являются рангово связанными. При этом число χ есть объективная характеристика графа $\bar{G}_U^{(s)}$, а отдельный цветной класс определяет состав параметрического кластера для разработки соответствующих норм электропотребления.

Заключение

Таким образом, рассмотрение явления ранговой динамики объектов техноценоза с использованием таких понятий как размещение, подстановка, множество, граф предопределило разработку специального раздела рангового анализа – комбинаторной теории ранговой динамики. Основной задачей данного раздела является описание закономерностей ранговой динамики с целью разработки моделей поведения больших технических систем техноценологического типа. Прикладное применение данных моделей видится в уточнении процедур интервального оценивания, нормирования, прогнозирования и потенцирования, нацеленных на решение задачи оптимального управления электропотреблением.

Литература

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Издательство ТГУ, 1993. 552 с.
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Компьютерная версия пер. и доп. М.: Издательство ТГУ – Центр системных исследований, 2005-2017. URL: <http://gnatukvi.ru>

3. Фуфаев В.В. Ценологическое влияние на электропотребление предприятия. Абакан: Центр системных исследований, 1999. 124 с.

4. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику (перевод с французского). М.: «Наука», 1975. 480 с.

5. Райгородский А.М. Экстремальные задачи теории графов и Интернет: учебное пособие. Долгопрудный: «Интеллект», 2012. 104 с.

6. Алексеев В.Е., Таланов В.А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: ИНТУИТ; Бином. Лаборатория знаний, 2012. 320 с.

References

1. Kudrin B.I. Vvedeniye v tekhnnetiku. Tomsk: Izdatel'stvo TGU, 1993. 552 s.

2. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroyeniya tekhnotsenozov. Komp'yuternaya versiya per. i dop.

M.: Izdatel'stvo TGU – Tsentri sistemnykh issledovaniy, 2005-2017. URL:<http://gnatukvi.ru>

3. Fufayev V.V. Tsenologicheskoye vliyaniye na elektropotrebleniye predpriyatiya.

Abakan: Tsentri sistemnykh issledovaniy, 1999. 124 s.

4. Kofman A. Vvedeniye v prikladnyuyu kombinatoriku (perevod s frantsuzskogo). M. : «Nauka», 1975. 480 s.

5. Raygorodskiy A.M. Ekstremal'nyye zadachi teorii grafov i Internet: uchebnoye posobiye. Dolgoprud-nyy: «Intellekt», 2012. 104 s.

6. Alekseyev V.Ye., Talanov V.A. Grafy i algoritmy. Struktury dannykh. Modeli vychisleniy. M. : INTUIT; Binom. Laboratoriya znaniy, 2012. 320 s.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 338.242

**ПРИНЦИПЫ ФИНАНСОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ
ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА В
РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОМ КОМПЛЕКСЕ****Альберт Гургенович Мнацакян**

доктор экономических наук, профессор, директор Института отраслевой экономики и управления
Калининградского государственного технического университета
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: mag@klgtu.ru

Роберт Альбертович Мнацакян

аспирант
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: robert_mnac@mail.ru

Аннотация

В рыбохозяйственном комплексе имеется ряд направлений деятельности, полноценное развитие которых невозможно без тесного взаимодействия государства и бизнеса. Сложность проблем и тесная связь рыбного хозяйства с другими частями социально-экономической системы страны обуславливают необходимость применения в отрасли механизмов ГЧП. Хотя пока в рыбохозяйственном комплексе России имеются лишь единичные примеры реализации проектов, которые по ряду признаков можно отнести к ГЧП, развитие такого партнерства предусмотрено мерами государственной отраслевой политики России. Целесообразность внедрения в отрасли механизмов партнерства подтверждают и результаты научных исследований, показывающие, что с помощью механизмов ГЧП могут быть успешно решены многие сложные проблемы отечественного рыбного хозяйства.

Целью статьи является совершенствование методического обеспечения, используемого для финансового моделирования проектов, осуществляемых на основе механизмов ГЧП.

В статье рассмотрена структура организации работ по моделированию проектов ГЧП, с учетом особенностей рыбной отрасли, изложены принципы построения финансовых моделей, даются рекомендации их практическому применению. Разработки могут служить методической основой для построения финансово-экономического механизма управления проектами ГЧП на всех этапах. Предлагаемые решения позволяют не только выбирать оптимальные варианты реализации проектов ГЧП, но и делать обоснованные выводы об эффективности использования этого перспективного механизма отраслевого развития.

Ключевые слова: рыбохозяйственный комплекс, государственно-частное партнерство, инвестиционный проект, финансовая модель, управление, оценка, выгоды, риски.

PRINCIPLES OF FINANCIAL MODELING OF PPP PROJECTS IN FISHERIES**Albert Gurgenovitch Mnacakanyan**

Doctor of Economy, professor, Director of the Institute of Industrial Economics and Management
of the Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: mag@klgtu.ru

Robert Albertovich Mnacakanyan

PG student
Kaliningrad State Technical University
236000, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: robert_mnac@mail.ru

Abstract

In the fishing industry of Russia there are some areas of activity development of which is impossible without the interaction of government and business. The use of PPP mechanisms in the industry is caused by the complexity of problems and the close relationship of the fisheries sector with other parts of the country's socio-economic system. Currently there are only a few examples of projects implementation in the Russian fishing industry, which can be attributed to PPPs, but the development

of such a partnership is stipulated by the state sectoral policy. The feasibility of implementing the PPP mechanisms in the industry is confirmed by the results of scientific research.

The aim of the paper is to improve the methodological support for financial modeling of projects implemented on the basis of PPP mechanisms.

The article describes the structure of works on the modeling of PPP projects, taking into account the peculiarities of the fishing industry, suggested the principles of financial models building, and gives recommendations for their practical application. The results of the research constitute a methodological basis for the construction of a financial and economic mechanism for the management of PPP projects at all stages. They allow choosing optimal options for implementing PPP projects in the fishing industry and drawing conclusions about the effectiveness of using this development mechanism.

Keywords: fishery, public-private partnership, investment project, financial model, management, evaluation, benefits, risks.

Введение

Рыбное хозяйство – одна из базовых отраслей российской экономики. От результатов его деятельности значительной мере зависит устойчивость работы ряда других отраслей, условия и уровень жизни многих россиян, экономическая безопасность страны. В силу комплексного характера рыбной отрасли вопросы ее функционирования занимают важное место в экономической политике, как на государственном, так и на региональном уровнях. В целях поддержки развития рыбного хозяйства в нашей стране в последние годы был принят ряд важных решений. Одним из них стало внедрение в отрасли механизмов государственно-частного партнерства (ГЧП) – особой формы взаимодействия государства и бизнеса, направленного на решение «общественно значимых задач на взаимовыгодных условиях» [1]. Отечественными авторами ГЧП часто трактуется как «...институциональный и организационный альянс между государством и бизнесом в целях реализации общественно значимых проектов и программ в широком спектре отраслей промышленности и НИОКР» [2].

Необходимость применения механизмов ГЧП в рыбном хозяйстве определяется сложностью проблем его развития, высокой социальной значимостью и тесными связями отрасли с другими частями социально-экономической системы страны. В рыбохозяйственном комплексе России и в смежных с ним отраслях имеется ряд направлений деятельности (например, такие как: эффективная организация промысла рыбы, рыбопереработка и обслуживание флота, аквакультурное производство рыбы и др.), полноценное развитие и даже функционирование которых невозможно без тесного взаимодействия государства и бизнеса. Важное место в деятельности рыбного хозяйства также занимают вопросы подготовки кадров и научного обеспечения. Актуальной является задача повышения социальной и общественной эффективности рыбного хозяйства, максимизации создаваемых отраслью эффектов и благ в интересах общества. Хотя в нашей стране пока имеются лишь единичные примеры реализации проектов в рыбохозяйственном комплексе, которые по

ряду признаков можно отнести к ГЧП, тесное сотрудничество государства с негосударственными структурами, предусматривается программными документами отраслевого развития [3, 4]. Целесообразность внедрения в отрасли механизмов партнерства подтверждают и результаты научных исследований, указывающих на то, что с помощью механизмов ГЧП могут быть успешно решены многие сложные проблемы отечественного рыбохозяйственного комплекса [5]. Этому способствует внедрение программного бюджета в практику управления общественными финансами. Фактически основным каналом бюджетного финансирования проектов ГЧП является финансирование мероприятий государственных (муниципальных) программ, формируемых, в том числе на принципе «установления для государственных программ измеримых результатов их реализации, то есть характеристики объема и качества реализации мероприятия, направленного на достижение конечного результата реализации государственной программы» [6].

Разработка комплекса мероприятий, составляющих основу отраслевого механизма ГЧП, их согласование с политикой развития рыбного хозяйства – непростая задача, решение которой требует значительных усилий и вряд ли возможно в формате одной статьи. Область данного исследования ограничивается рядом экономических аспектов, на наш взгляд, имеющих важное значение для обеспечения партнерского взаимодействия государства и бизнеса в отрасли, а именно, методологией финансового моделирования проектов, осуществляемых на основе механизмов ГЧП.

1. Содержание процесса моделирования проектов ГЧП в рыбной отрасли

Методы финансового моделирования проектов выступают одной из центральных частей механизма ГЧП. Эти методы в той или иной мере применяются на всех уровнях и этапах управления проектами в сфере рыбного хозяйства, кроме того они повышают качество обоснования мероприятий государственных (муниципальных) программ [7]. При этом если на ранних этапах процесса управления методы финансового моделирования, как правило, носят оценочный характер, то на более поздних

стадиях они приобретают роль главного инструмента управления проектами.

В настоящее время, на достигнутом уровне развития инструментальной базы стратегического и финансового менеджмента, качестве методологической основы для разработки финансовой модели проектов ГЧП, реализуемых в сфере рыбного хозяйства, имеет смысл использовать технологию бюджетирования, расширенную за счет включения методов и инструментов оценки неденежных факторов [8]. Целесообразность применения такого подхода, как отмечалось выше, обусловлена комплексным характером многих проблем отрасли, в значительной части имеющих неэкономические причины и последствия. Особенность проектов, реализуемых в сфере рыбохозяйственного комплекса, состоит в возникающих в процессе их реализации существенных внешних эффектах, а так же значительном числе и разнообразии участников. Такого рода эффекты, связанные с внешним окружением проекта, представляют собой совокупность общеэкономических и неэкономических факторов, не находящие адекватного отражения в рыночных ценах на создаваемые проектом продукцию и услуги. Для их учета, как правило, формируются государственные (муниципальные) программы, которые рассматривают факторы с точки зрения соответствующего уровня управления. Следует отметить, что в отличие от стандартных

финансовых моделей, например моделей анализа инвестиций, обычно пренебрегающих влиянием внешних эффектов, технология бюджетирования содержит определенные возможности для учета этих факторов, например, путем имплементации методик, прикладных решений и наработок созданных в рамках концепции устойчивого развития. Дополнительным доводом в пользу предлагаемого подхода являются результаты исследований, доказывающих, что учет и использование в деятельности компаний практик устойчивого развития дает им ощутимые преимущества перед конкурентами [9].

Предложенный подход к финансовому моделированию должен применяться на всех этапах процесса управления проектами ГЧП, начиная от разработки концепции и заканчивая стадией реализации. Такая преемственность обеспечивает, с одной стороны обоснованность предлагаемых проектов, а с другой – возможность детализации и усложнения финансовой модели, по мере развития проекта, что, в конечном счете, существенно повышает роль финансового планирования как инструмента согласования и контроля действий всех участников проекта. На рис. 1 приведена последовательность выполнения работ на начальном этапе разработки проектов в сфере рыбохозяйственного комплекса, реализуемых в соответствии с положениями и принципами ГЧП.

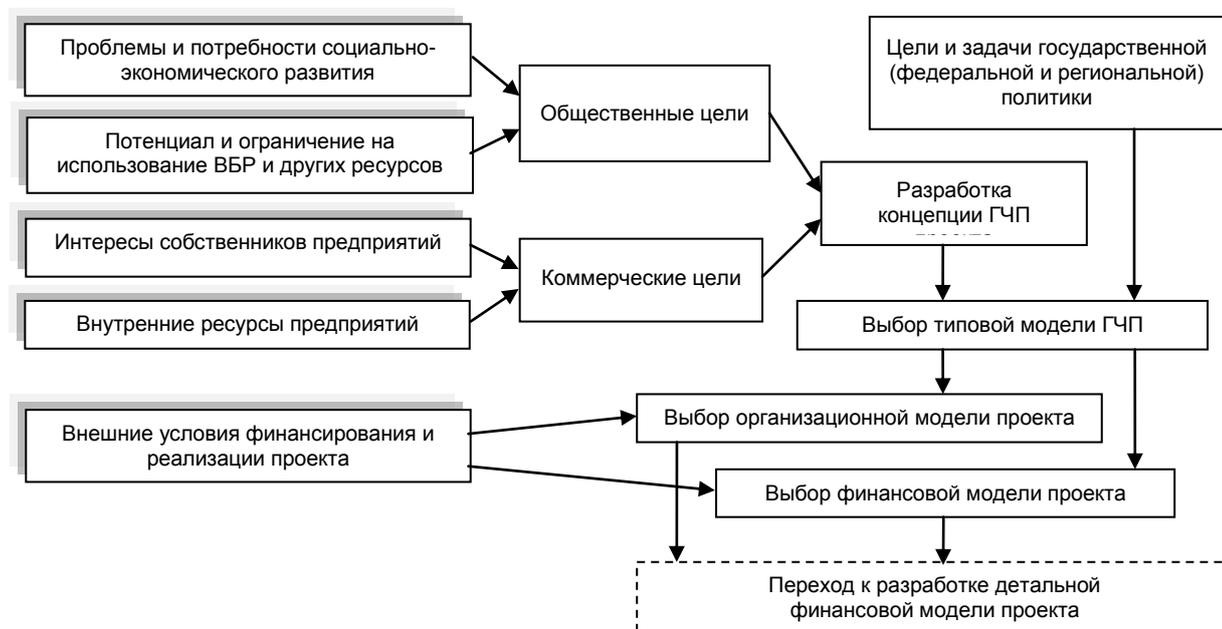


Рис. 1. Начальный этап формирования организационно-финансовой модели проектов ГЧП в отраслях рыбохозяйственного комплекса

На начальном этапе проектирования обычно отсутствует необходимость в применении сложных финансовых моделей. Основными

требованиями, предъявляемыми к моделям этого этапа, являются: минимализм исходной информации, гибкость и простота, возможность

оперативной интерпретации результатов расчетов. Исходя из этого, на начальном этапе разработки проектов ГЧП в сфере рыбного хозяйства, а так же на этапе обоснования мероприятий соответствующих программ предпочтение следует отдавать стандартным решениям, входящим в состав универсального программного обеспечения для инвестиционного проектирования и расчетов. В настоящее время в распоряжении разработчиков есть довольно широкий ассортимент такого рода продуктов, позволяющих решать разнообразные задачи управления проектами, в том числе, легко адаптируемых в соответствии со спецификой рыбной отрасли.

Однако уже на следующем этапе, требующем куда более детальную проработку финансового механизма ГЧП, стандартные программные решения могут оказаться неэффективными – они не способны с достаточной степенью точности и достоверности описывать многие аспекты, возникающие в связи с реализацией проекта как внутри предприятия, так и в его экономическом и социальном окружении. Основным документом, формируемым на этом этапе, становится финансовая модель инвестиционного проекта в ее классическом понимании. Отметим, что исходя из принципа преемственности, данная модель представляет собой дальнейшее развитие и конкретизацию разработанной на предыдущем этапе концептуальной модели. Однако в отличие от нее, полноценная финансовая модель содержит показатели, предназначенные не только для общей оценки проекта, но и для управления отдельными аспектами его реализации. Разработанная с учетом этого требования финансовая модель включает набор целевых индикаторов, используемых при выработке и принятии управленческих решений, а также мониторинге результатов, полученных в процессе осуществления проекта, что позволяет, с одной стороны, оперативно и разносторонне контролировать результаты самого проекта, а с другой, держать в фокусе управления преследуемые проектом или программой, в рамках которой осуществляется бюджетное финансирование стратегические цели [10].

В общем виде финансовая модель проекта ГЧП в рыбохозяйственном комплексе представляет собой определенным образом структурированную совокупность показателей, характеризующих финансовую сторону будущей (планируемой) совместной деятельности чаще всего рассматриваемой в рамках обособленного бизнес-контура. В соответствии с бюджетным подходом, основу финансовой модели, составляют типовые документы, сгруппированные по уровню управления:

- сводный бюджет (основной бюджет, мастер-бюджет), включающий: бюджет движения денежных средств, бюджет доходов и

расходов, прогнозный баланс, инвестиционный бюджет;

- функциональные бюджеты: бюджет продаж, бюджет запасов, бюджет прямых материальных затрат, бюджет затрат на оплату труда, бюджет общепроизводственных расходов, бюджет общехозяйственных расходов, бюджет коммерческих расходов;

- операционные бюджеты отдельных бизнес-единиц (подразделений) предприятия.

Использование полноценной финансовой модели проекта ГЧП предполагает определенную последовательность действий: сначала задаются исходные данные, а затем на их основе рассчитываются промежуточные и итоговые показатели. При этом процесс моделирования носит итеративный характер – первоначально составленные операционные, функциональные и основной бюджеты подвергаются неоднократной корректировке и уточнению с тем, чтобы обеспечить соответствие достигнутого финансового состояния первоначально установленным целям (или, возможно, скорректировать эти цели).

Очередным этапом финансового конструирования является создание рабочей модели, используемой для непосредственного управления финансами. Модели данного типа призваны обеспечивать устойчивость предприятия, реализующего проект, деятельность которого сбалансирована в долгосрочном периоде, как с точки зрения задействованных ресурсов, так и получаемых результатов (эффектов). Для того чтобы соответствовать этому требованию, рабочая модель должна включать в себя помимо системы учетных и аналитических финансово-экономических документов также сведения неэкономического характера, всесторонне описывающие внешние эффекты, связанные с реализацией проекта и, одновременно, оказывающие влияющие на его финансовые результаты. Совокупность документов, образующих рабочую модель управления финансами проекта укрупнено может быть представлена несколькими модулями:

- модуль управленческого учета, прогнозирования, оценки и контроля экономических и неэкономических показателей;

- модуль финансового контроля и прогнозирования;

- модуль бухгалтерского учета и отчетности.

Разработка финансовой модели управления финансами рыбохозяйственного проекта, реализуемого на принципах ГЧП, является частной задачей прикладного характера, решение которой во многом зависит от специфики проекта и от особенностей его внешнего окружения. Следует отметить, что методология построения моделей управления финансами предприятий, в том числе предприятий рыбохозяйственного комплекса, достаточно хорошо проработана в научной и

прикладной литературе. Поэтому, по нашему мнению, на данном этапе, так же как и на этапе принятия решения о завершении проекта (этап дезинвестиций), можно воспользоваться готовыми методическими разработками, подобрав и адаптировав их в соответствии с условиями конкретного проекта.

Заключительным этапом построения финансово-экономического механизма ГЧП в отраслях рыбохозяйственного комплекса, является процедура проверки разработанных моделей на предмет соответствия созданной с их помощью искусственной, во многом абстрактной конструкции реальным тенденциям, существующим в масштабах всей отрасли, страны или той территории, на которой реализуется проект. Такого рода задача (т.н. процедура верификации) обычно решается ретроспективным методом или методом контрольных точек. В этом случае задаются такие начальные значения переменных, которые через определенное количество шагов процесса моделирования должны привести моделируемую систему (проект, предприятие) в состояние, заранее известное исследователю. Аналогичный подход можно использовать и при оценке моделей проектов ГЧП, реализуемых в отраслях рыбного хозяйства, с поправкой на ограниченные возможности ретроспективного метода учитывать качественные сдвиги в состоянии предприятия, отрасли, рынка. Альтернативой является применение методов неформальных экспертных оценок, которые, однако, тоже имеют свои недостатки.

2. Рекомендации для моделирования проектов ГЧП в отраслях рыбного хозяйства

Важным компонентом финансового моделирования проектов ГЧП в сфере рыбохозяйственного комплекса является описание и учет проектных рисков. Как известно, преимуществом проектов ГЧП является возможность распределения рисков между участниками проектов и управления рисками, что, в конечном счете, обеспечивает их минимизацию. Согласно канонам ГЧП, оптимальным является тот вариант проекта, в рамках которого каждый из партнеров принимает на себя лишь те риски, которыми он может эффективно управлять. Данный принцип, составляющий одну из основ типового механизма организации ГЧП, должен использоваться для анализа выгод при реализации проектов в отраслях рыбохозяйственного комплекса.

С анализом и учетом рисков проектов ГЧП тесно связана задача органического включения в систему финансового моделирования различного рода неэкономических показателей, характеризующих внешние эффекты, возникающие в процессе реализации проекта. Возможным решением этой задачи может стать использование положений концепции Value for Money (Финансовая выгода) [11, 12], разработанной для оценки смешанных

общественно-частных проектов на предмет соответствия получаемых результатов (выгод) тем средствам, которые потребуются для их достижения. Применительно к нашей проблеме – анализу выгоды проектов ГЧП в рыбной отрасли – суть концепции сводится к сопоставлению объема необходимых для реализации проекта ресурсов (в стоимостном выражении) и полученного в итоге комплексного эффекта, с учетом поправок на риск. Преимуществом данного подхода является относительная простота его интеграции в финансово-экономический механизм проектов ГЧП.

Использование концепции Value for Money для оценки проектов ГЧП в сфере рыбного хозяйства, должно опираться на ряд универсальных принципов, руководствуясь которыми, на наш взгляд, можно повысить качество принимаемых решений. В их числе:

- проекты ГЧП по сравнению с другими способами решения проблемы априори должны быть более выгодными. Чтобы выявить это необходимо сравнивать, как минимум, два варианта – «базовый», описывающий реализацию проекта одним или несколькими участниками одного типа (только государство либо только бизнес-структуры), а также сценарий, предполагающий смешанное государственно-частное участие.

- эффекты от использования механизмов ГЧП должны быть не только измеримыми, но и иметь преимущественно стоимостное выражение. Все значимые не стоимостные факторы и результаты должны находить адекватное отражение в финансовых и экономических показателях проекта.

- перечень анализируемых рисков проектов ГЧП должен включать все наиболее существенные виды рисков, в том числе, обычно не учитываемых в анализе инвестиционных проектов (например, репутационные риски бизнеса, социальные и экологические риски в их широком понимании).

Поскольку оценка выгод проекта в отраслях рыбного хозяйства, реализуемого на принципах ГЧП, нацелена на поиск наилучшего соотношения между выгодами каждого из участников и рисками, связанными с получением этих выгод необходима четкая дефиниция понятия «выгода». В данном случае выгода представляет собой оптимальную (т.е. в наибольшей мере отвечающую интересам участников проекта) комбинацию стоимостных (например, рыночной стоимости или иных финансовых показателей, в обобщенном виде отражающих коммерческую сторону проекта) и нестоимостных (например, различного рода социальных и экологических показателей) характеристик проекта, либо достижения целей соответствующей государственной (муниципальной) программы, элементом которой является проект ГЧП, которые могут носить неэкономический характер. Анализ выгод должен осуществляться на всех этапах планирования и

реализации проекта – от разработки концепции до принятия решения о его прекращении. По сути – это процесс непрерывного мониторинга финансовых, экономических и неэкономических результатов проекта, в центре которого – сравнение величин достигнутых показателей с их целевыми значениями и, при необходимости, оперативное принятие мер, направленных на исправление ситуации.

В соответствии с изложенными выше принципами, для оценки проектов ГЧП в сфере рыбного хозяйства применяется подход, основанный на сравнении двух вариантов: во-первых, для случая, предполагающего только государственное или частное участие и, во-вторых, для случая смешанного государственно-частного осуществления проекта. В

основе сравнения лежит какой-либо интегральный показатель, одновременно включающий в себя экономические и неэкономические характеристики проекта (например, показатель обобщенной стоимости [13], либо другой, комплексно характеризующий ценность проекта или ее изменение). Разница между значениями показателей для двух вариантов составляет величину выгоды. Основная причина ее возникновения – различный уровень внутренних и внешних рисков сравниваемых альтернатив (при прочих равных условиях):

$$B = ИП_{ГЧП} - ИП_{баз}$$

В схематичном виде предлагаемый подход представлен на рис. 2.

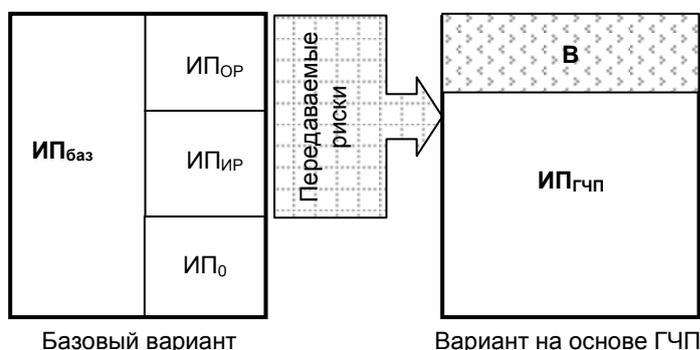


Рис. 2. Оценка выгоды путем сравнения вариантов проекта «только с частным или только с государственным участием» и «ГЧП»

Обозначения: $ИП_{баз}$ – интегральный показатель проекта только с частным или государственным участием; $ИП_{ГЧП}$ – интегральный показатель проекта ГЧП; $ИП_{ОР}$ – вклад операционных рисков в интегральный показатель проекта; $ИП_{ИР}$ – вклад инвестиционных рисков в интегральный показатель проекта; $ИП_0$ – интегральный показатель проекта в случае отсутствия рисков; B – величина выгоды для варианта проекта ГЧП.

Высокая волатильность рыночной экономики и сложность прогнозирования рыбохозяйственной деятельности, зависящей от множества факторов, сильно затрудняют оценку выгод и рисков проектов ГЧП в сфере рыбного хозяйства. Для минимизации этой неопределенности, повышения достоверности и точности результатов финансового моделирования можно рекомендовать использование ряда подходов. Во-первых, чтобы снизить субъективность прогнозов все варианты реализации проекта должны опираться на установленные плановые задания и производственные показатели. Например, предусматривать полное освоение объема квот на добычу водных биоресурсов, выделенных участникам проекта, выполнение государственных контрактов на строительство судов, разработку новой техники и т.п. Важным также является учет, вне зависимости от варианта проекта, всех связанных с его реализацией издержек, как явных, так и скрытых [13]. Выявление и прогнозирование всех существенных статей доходов и расходов

может базироваться на ретроспективных данных о деятельности участников проекта и аналогичных предприятий отрасли, а также на имеющейся рыночной информации. Рекомендуется придерживаться умеренно-пессимистического варианта прогноза, когда фактические и ожидаемые рыночные или статистические данные корректируются так, чтобы исключить неоправданное занижение затрат и завышение доходов в будущем. Во-вторых, необходима идентификация и тщательный анализ всех видов рисков, связанных с проектом. Среди рисков проектов ГЧП, как минимум, должны учитываться риски возможного снижения спроса на продукцию и услуги, а также роста операционных и инвестиционных затрат. Кроме того, следует помнить, что величина одних и тех же рисков может быть различной для государственных участников и для компаний частного сектора. А частные партнеры могут иметь разную склонность к принятию на себя тех или иных проектных рисков. В-третьих, важным аспектом, влияющим на результаты проектов (прежде

всего, на их финансовые показатели) являются условия финансирования. Это обуславливает необходимость ответственного подхода к сбору и анализу информации о состоянии финансовых рынков, на которых предполагается получение ресурсов для финансирования проектов. Важной мерой, существенно улучшающей условия финансирования, является обеспечение открытости и транспарентности проекта. Не следует также забывать, что выбор оптимального масштаба и формы участия государства в проекте ГЧП оказывает позитивное влияние не только на его устойчивость, но и на позиции проекта на рынках капитала.

Заключение

Изложенные выше подходы, принципы и рекомендации можно использовать в качестве методической основы построения финансово-экономического механизма проектов ГЧП, реализуемых в рыбной отрасли. Они могут найти отражение в рамках различных моделей,

применяемых на всех этапах управления проектами и при разработке государственных (муниципальных) программ, включающих в качестве мероприятий такие проекты. Предлагаемые решения позволяют не только выбирать оптимальные варианты реализации проектов ГЧП, но и делать обоснованные выводы об эффективности использования этого перспективного механизма отраслевого развития. Сочетание финансовых подходов к управлению проектами с неэкономическими критериями, играющими важную роль в проектах ГЧП, позволит, с одной стороны, четко сформулировать цели, преследуемые каждым из участников и проектом в целом, а с другой, установить ясные индикаторы контроля степени достижения этих целей. Такой подход может также служить удобной основой для разработки других составляющих механизма реализации проектов ГЧП – системы мероприятий, направленных на обеспечение устойчивого развития проекта в долгосрочной перспективе.

Литература

1. Guidelines for Successful Public-Private Partnerships // European Commission Directorate-General Regional Policy. 2003.
2. Варнавский В.Г. Процессы институциональной адаптации частно-государственного партнерства к реальной экономике [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.opec.ru/point_doc.asp?tmpl=point_doc_print&d_no=50580#33
3. Государственная программа Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса» до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.07.2013 г.
4. Концепция развития рыбного хозяйства Российской Федерации на период до 2020 года. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 02.09.2003 г. №1265-р (в ред. распоряжения Правительства РФ от 21.07.2008 г. №1057-р).
5. Мнацаканян Р.А. Становление и развитие государственно-частного партнерства // Балтийский экономический журнал. 2015. №2(14). С. 91-98.
6. Приказ министерства экономического развития российской федерации от 16 сентября 2016 г. № 582 «Об утверждении Методических указаний по разработке и реализации государственных программ Российской Федерации».
7. Кузин В.И. Программные подходы к финансированию инновационного развития рыбохозяйственного комплекса / Проблемы, возможности, перспективы развития экономики, управления, торгового дела: Шестые Ходыревские чтения: сб. материалов всероссийск. науч.-практической конф. Курск. 4 декабря 2015 г. / под ред. докт. экон. наук, проф. В.Н. Ходыревской. Курск. гос. ун-т. Курск. 2015. С. 175-178
8. Мнацаканян А.Г., Корнева О.В. Совершенствование бизнес-процессов предприятий рыбной отрасли // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2014. №7(193). С. 26-31.
9. Six Growing Trends in Corporate Sustainability. Ernst & Young LLP & Green Biz Group. Режим доступа: <http://2sustain.com/2012/03/ernst-young-financial-considerations-drive-sustainability-activities.html#more-2855>
10. Кузин В.И. Анализ показателей (индикаторов) эффективности реализации государственных программ Калининградской области // Балтийский экономический журнал. 2015. №2(14). С. 23-30.
11. Public Administration after 'New Public Management'. Value for Money in Government series. Paris. OECD. 2010. 114 p.
12. DFID's Approach to Value for Money (VfM). Department for International Development. 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/49551/DFID-approach-value-money.pdf
13. Харин А.Г. Расширенная концепция управления на основе стоимости: теория, методология, практика: монография. Калининград. Изд-во БФУ им. И. Канта. 2014. 294 с.
14. Мнацаканян А.Г., Харин А.Г. Использование методологии динамического анализа при принятии решений о предоставлении квот на инвестиционные цели // Рыбное хозяйство. 2017. №1. С. 11-17.

References

1. Guidelines for Successful Public-Private Partnerships. European Commission Directorate-General Regional Policy. 2003.
2. Varnavskiy V.G. Processy institucional'noy adaptatsii chasto-gosudarstvennogo partnerstva v real'noy ekonomike. [http://www.opec.ru/point_doc.asp? tmpl=point_doc_print&d_no=50580#33](http://www.opec.ru/point_doc.asp?tmpl=point_doc_print&d_no=50580#33)
3. Gosudarstvennaya programma Rossiiskoy Federatsii 'Razvitiye rybohozyaistvennogo kompleksa do 2020 goda'. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 11.07.2013 g.
5. Mnacakanyan R.A. Stanovlenie i razvitiye gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Baltiiskii i ekonomicheskii zhurnal. 2015. No.2(14). S. 91-98.
6. Konceptsiya razvitiya rybnogo hozyaistva Rossiiskoy Federatsii na period do 2020 goda. Odobrena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 02.09.2003 g. No.1265-r (v red. Rasporyazheniya Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 21.07.2008 g. No.1057-r).
- Prikaz ministerstva ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoy Federatsii ot 16.09.2016 g. No.582 'Ob utverzhenii Metodicheskikh ukazanii po razrabotke i realizatsii gosudarstvennykh program Rossiiskoy Federatsii'.
7. Kuzin V.I. Programmnye podchody k finansirovaniyu innovatsionnogo razvitiya rybohozyaistvennogo kompleksa. Problemy, vozmozhnosti, perspektivy razvitiya ekonomiki, upravleniya, torgovogo dela; Shestyeh Hodyevskie chteniya; sbornik materialov vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kursk. 2015. S. 175-178.
8. Mnacakanyan A.G., Korneva O.V. Sovershenstvovanie biznes-protsessov predpriyatiy rybnoy otrasli. Finansovaya analitika: problem i resheniya. 2014. No.7 (193). S. 26-31.
9. Six Growing Trends in Corporate Sustainability. Ernst&Young LLP & GreenBizGroup. <http://2sustain.com/2012/03/ernst-young-financial-considerations-drive-sustainability-activities.html#more-2855>
10. Kuzin V.I. Analiz pokazatelei (indikatorov) effektivnosti realizatsii gosudarstvennykh program Kaliningradskoy oblasti/ Baltiiskii ekonomicheskii zhurnal. 2015. No. 2(14). S. 23-30.
11. Public Administration after 'New Public Management'. Value for Money in Government series. Paris. OECD. 2010. 114 p.
12. DFID's Approach to Value for Money (VfM). Department for International Development. 2011. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/49551/DFID-approach-value-money.pdf
13. Kharin A.G. Rasshyrennaya konceptsiya upravleniya na osnove stoimosti: teoriya, metodologiya, praktika: monografiya. Kaliningrad. Izd-vo BFUim.I. Kanta. 2014. 294 s/
14. Mnacakanyan A.G., Kharin A.G. Ispol'zovanie metodologii dinamicheskogo analiza pri prinyatii resheniy o predostavlenii kvot na investitsionnye celi. Rybnoe khozyaystvo. 2017. No.1. S. 11-17.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ В МОРСКИХ ПОРТАХ

Татьяна Сергеевна Станкевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях»
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: tatiana.stankevich@kgtu.ru

Аннотация

В статье рассмотрена актуальная задача разработки программного продукта – системы поддержки принятия управленческих решений, осуществляющей информационное и аналитическое обеспечение деятельности руководителя тушения пожара в морских портах. В статье обоснован выбор инструмента построения программного продукта. Рассмотрены особенности практической реализации предложенной системы поддержки принятия решения с учетом требований унификации программных средств. Исследованы и учтены специфические особенности тушения пожаров в морских портах в сложных условиях и практические аспекты применения системы предполагаемыми пользователями. В статье выполнена разработка пользовательского интерфейса системы поддержки принятия решений руководителем при локализации и ликвидации пожаров и представлен внешний вид главных и дочерних диалоговых окон: главного диалогового окна «Система информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах»; дочерних диалоговых окон первого уровня «Прогноз развития пожара», «Здание», «Нормативно-правовая база» и «Пожарная охрана города».

Ключевые слова: программный продукт, система поддержки принятия решений, руководитель тушения пожара, морские порты, унификация.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF FIRE FIGHTING MANAGEMENT PROCESS AT SEAPORTS

Tatiana S. Stankevich

PhD, associate professor of protection in emergency situations department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect 1, Kaliningrad 236022 Russian Federation
E-mail: tatiana.stankevich@kgtu.ru

Abstract

The paper considers the relevant issue of the software development – a decision support system that provides information and analytical support for the activity of firefighting management staff at the seaports. The author justifies the choice of the tool for building this software. In the article, the author considers the features of practical implementation of the proposed decision support system taking into account the requirements for the unification of software. Specific features of firefighting at seaports under complex circumstances and practical aspects of the system's application by prospective users have been investigated and taken into account. The author has developed a user interface of the decision support system for firefighting management staff. The article presents the appearance of the main and additional forms of the system interface: the main form 'Information and Analytical Support System for Fire Fighting Process Management at Seaports'; additional forms of the first level 'Fire forecast', 'Building', 'Legislative documents' and 'Fire protection of the city'.

Keywords: software, decision support system, manager of fire extinguishing, seaports, unification.

Введение

В работе [1] для решения актуальной задачи совершенствования принятия управленческих решений руководителем тушения пожара (РТП) в морских портах в условиях неопределенности предложено разработать систему поддержки

принятия решений. Реализация системы, обеспечивающей информационное и аналитическое обеспечение деятельности РТП в морских портах и основанной на применении элементов искусственного интеллекта, направлена на повышение эффективности управленческой деятельности руководителя в сложных условиях.

Первый этап построения системы поддержки принятия решений руководителем при локализации и ликвидации пожаров, заключающийся в разработке функциональной структуры системы, подробно рассмотрен в [1].

Следующим этапом разработки предложенной системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе элементов искусственного интеллекта является практическая реализация системы в виде программного продукта.

1. Цель и задачи исследования

Цель исследования – описание особенностей практической реализации программного продукта – системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе элементов искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели необходимо: выбрать среду разработки программного продукта; выполнить построение программного продукта с учетом требований унификации программ, специфических особенностей тушения пожаров в морских портах в сложных условиях и практических аспектов применения системы предполагаемыми пользователями.

2. Особенности построения программного продукта

В ходе практической реализации системы поддержки принятия управленческих решений РТП выполнен сравнительный анализ наиболее распространенных инструментов построения

программных продуктов [2]. На основании результатов анализа в качестве инструментов программирования выбраны: пакет прикладных программ Matlab с Fuzzy Logic и интегрированная среда разработки программного обеспечения для Microsoft Windows на языке Delphi.

После решения задачи выбора эффективной среды программирования выполнено исследование требований унификации программных средств для удовлетворения потребности РТП в предоставлении руководителю широкого набора информационных и аналитических ресурсов для решения управленческих задач.

В соответствии с [3 – 6] выявлены ключевые принципы унифицированного подхода к разработке программного продукта – системы поддержки принятия решений РТП при тушении пожаров в морских портах. Согласно [2] выявлены основные специфические особенности тушения пожаров в морских портах в сложных условиях и практические аспекты применения системы предполагаемыми пользователями. При проектировании и практической реализации программного обеспечения системы, обеспечивающей информационное и аналитическое обеспечение деятельности РТП в морских портах, реализована совокупность данных принципов. Перечень принципов и их практическая реализация при разработке предложенной системы представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Особенности практической реализации программного продукта

Таким образом, выполнен выбор среды разработки системы поддержки принятия управленческих решений, осуществляющей информационное и аналитическое обеспечение деятельности РТП в морских портах: пакета прикладных программ Matlab с Fuzzy Logic и интегрированной среды разработки

программного обеспечения для Microsoft Windows на языке Delphi. Осуществлено построение программного продукта с учетом требований унификации программ, специфических особенностей тушения пожаров в морских портах в сложных условиях и

практических аспектов применения системы предполагаемыми пользователями.

3. Разработка пользовательского интерфейса программного продукта

При построении программы необходимо разработать пользовательский интерфейс, обеспечивающий взаимодействие между пользователем и элементами системы посредством главного и дочерних диалоговых окон. Интерфейс программы позволит пользователю решать управленческие задачи, получать объяснение результатов работы системы, пополнять базу данных и базу знаний системы.

Интерфейс пользователя разработан с учетом требования «дружелюбности» [2, 6] к пользователю с целью сокращения сроков освоения системы и обеспечения удобства при ее использовании. В соответствии с эргономическими требованиями [2, 6] диалоговые окна интерфейса: выполнены в едином стиле; на них размещено рациональное количество информации, необходимой для работы, чтобы не допустить информационной перегруженности окон; размещение элементов осуществлено с учетом обеспечения минимизации действий пользователя, необходимых для подключения часто требуемых функций.

Главное диалоговое окно «Система информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах» (рисунок 2) позволяет пользователю вызывать все остальные формы. Разработанный интерфейс обеспечивает взаимодействие пользователя с другими подсистемами

посредством диалоговых форм, предназначенных решения основных задач:

– для выбора ранга пожара и прогнозирования динамики развития пожара – диалоговая форма «Прогноз развития пожара» (рисунок 3);

– для предоставления пользователю справочной и нормативной информации в области пожаротушения: диалоговое окно «Здание» (рисунок 4) с дочерними формами «Противопожарная защита здания», «Объемно-планировочные решения здания», «Коммуникации здания», «Пожарная охрана порта», «Характеристика строительных конструкций здания»; диалоговое окно «Нормативно-правовая база» (рисунок 5); диалоговое окно «Пожарная охрана города» (рисунок 6).

В ходе разработки программного продукта использованы современные информационные технологии, что позволило реализовать дополнительные сервисные возможности для оказания помощи пользователю в работе: очистка данных в окне формы; печать результатов; сохранение результатов.

Кроме того для повышения толерантности системы к ошибкам предусмотрена опция информирования пользователя об ошибках. Сообщения об ошибке демонстрируются пользователю в случае ввода им некорректных исходных данных в форму, то есть данных, которые не могут быть использованы системой в расчетах: отрицательных, дробных и т.п. Дополнительно внедренная в систему функция автоматического оповещения об ошибке позволяет снизить влияние человеческого фактора на результаты работы системы.

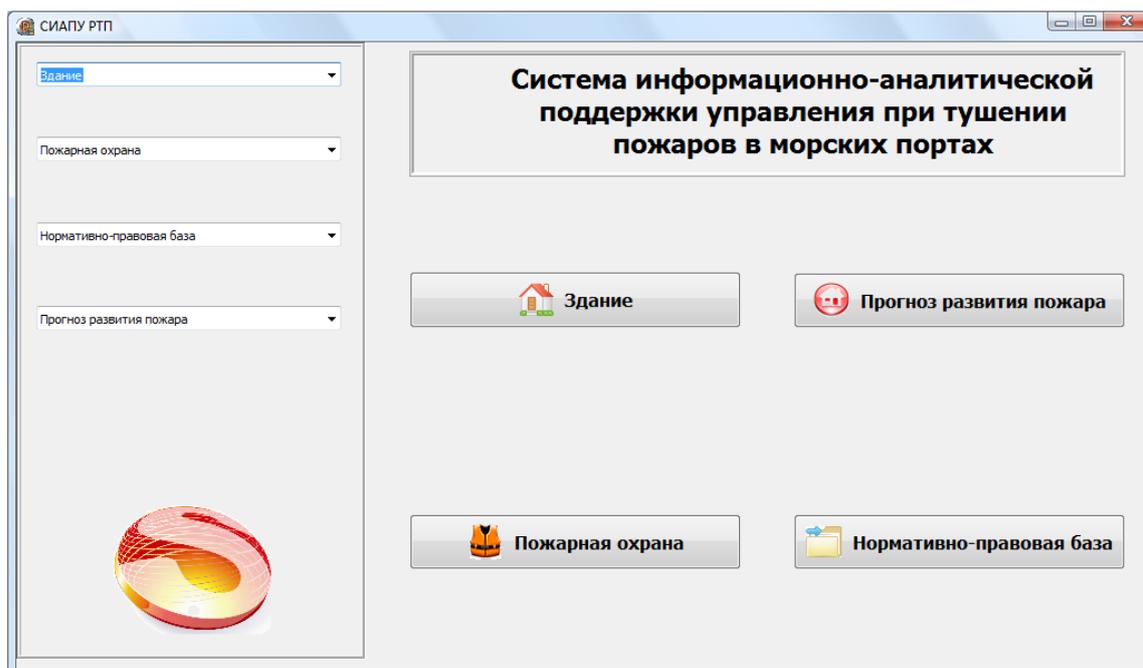


Рис. 2. Главное диалоговое окно системы

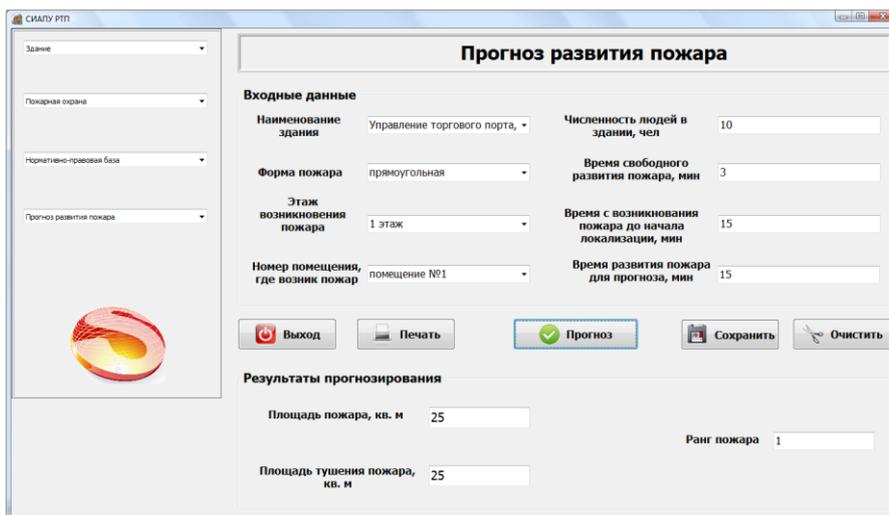


Рис. 3. Дочернее окно системы первого уровня «Прогноз развития пожара»

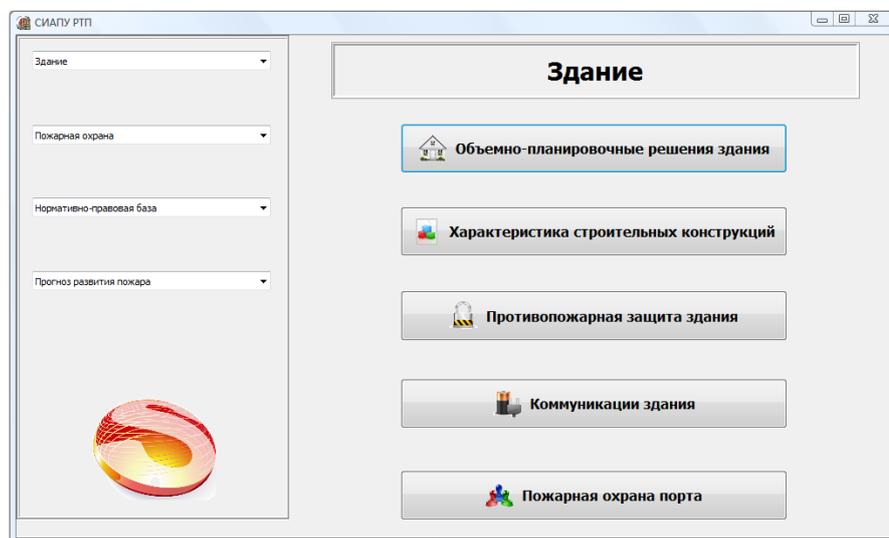


Рис. 4. Дочернее окно системы первого уровня «Здание»

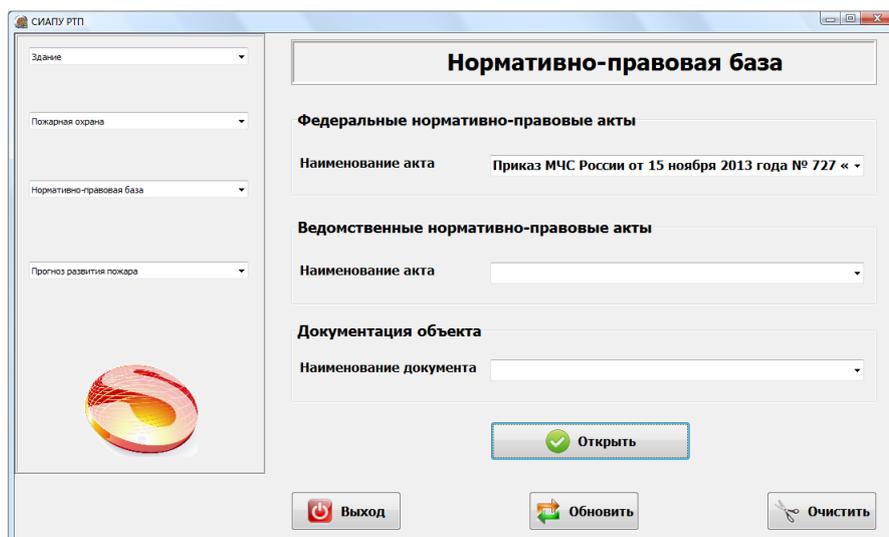


Рис. 5. Дочернее окно системы первого уровня «Нормативно-правовая база»

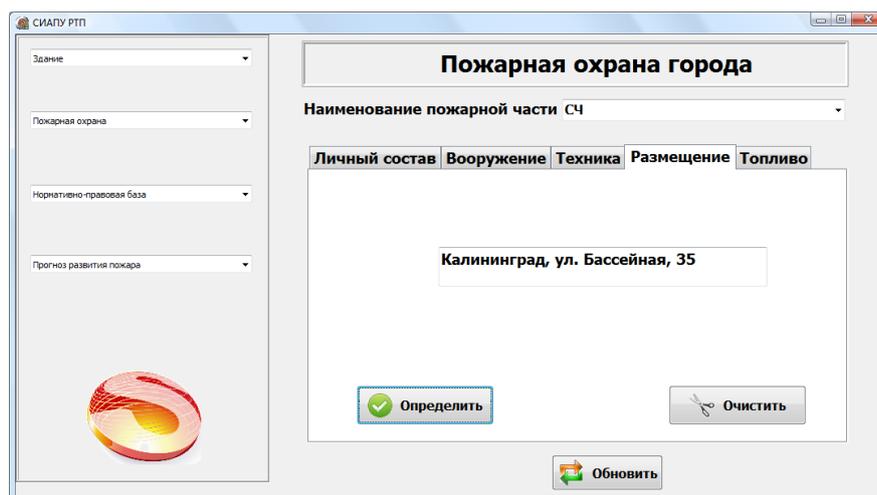


Рис. 6. Дочернее окно системы первого уровня «Пожарная охрана города»

По результатам разработки программного обеспечения получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ [7].

Таким образом, выполнена разработка пользовательского интерфейса программного

продукта, благодаря которому достигается достаточная для практики производительность пользователя в сложных условиях тушения пожаров в морских портах и обеспечивается психологически комфортная работа для предполагаемого пользователя.

Заключение

1. При разработке и внедрении системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе элементов искусственного интеллекта выполнен сравнительный анализ наиболее распространенных инструментов построения программных продуктов. Произведенный анализ позволил осуществить выбор эффективной среды разработки предложенной системы – пакет прикладных программ Matlab с Fuzzy Logic и интегрированная среда разработки программного обеспечения для Microsoft Windows на языке Delphi.

2. В работе осуществлен анализ требований унификации программ, специфических особенностей тушения пожаров в морских портах в сложных условиях и практических аспектов применения системы предполагаемыми пользователями. Выполнено построение программного продукта для РТП с учетом рассмотренных особенностей и требований с

целью обеспечения адаптации системы к решаемым задачам с учетом предпочтений РТП и быстрой интеграции программы в информационную среду объекта.

3. Разработан пользовательский интерфейс программного продукта, благодаря которому обеспечивается быстрая и эффективная работа пользователя с системой поддержки принятия решений.

Благодарности

Научное исследование поддержано грантом федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках выполнения проектов № 17114 «Разработка нечеткого классификатора определения ранга пожара на особо важных и технически сложных объектах».

Литература

1. Станкевич, Т.С. Функциональное моделирование системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах / Т.С. Станкевич // Морские интеллектуальные технологии. 2017. №3 (37), Т.1. С. 90-95.

2. Станкевич, Т.С. Информационно-аналитическая поддержка управления при тушении пожаров в морских портах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / Станкевич Татьяна Сергеевна. Москва, 2016. 172 с.

3. Судаков, В.А. Методология унифицированной разработки систем поддержки принятия решений для многокритериальных высокоразмерных задач ракетно-космической отрасли: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01 / Судаков Владимир Анатольевич. Москва, 2014. 300 с.
4. Судаков, В.А., Осипов, В.П. Унификация разработки программного обеспечения прикладных СППР / В.А. Судаков, В.П. Осипов // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014). – М.: изд-во ИПУ РАН, 2014. С. 8855-8863.
5. Осипов, В.П., Сивакова Т.В., Судаков, В.А. Предпосылки унификации программных средств поддержки принятия решений / В.П. Осипов, Т.В. Сивакова, В.А. Судаков // Программные продукты и системы. 2013. №3. С. 147-150.
6. Software engineering. Product quality. Part 1: Quality model: ISO/IEC 9126-1:2001. Switzerland, 2001. 25 p.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Интеллектуальная система поддержки принятия решения на базе нечетких нейронных сетей для руководителя тушения пожара на территории ОАО «Калининградского морского торгового порта» / Т.С. Станкевич, А.В. Кипер. № 2013661903; заявл. 22.10.2013; опублик. 18.12.2013, Бюл. № 12 (86).

References

1. Stankevich, T.S. Funkcional'noe modelirovanie sistemy informacionno-analiticheskoy podderzhki upravlenija pri tushenii pozharov v morskikh portah, T.S. Stankevich. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. №3 (37), T.1. pp. 90-95.
2. Stankevich, T.S. Informatsionno-analiticheskaya podderzhka upravleniya pri tushenii pozharov v morskikh portakh: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.10. Stankevich Tat'yana Sergeevna. Moskva, 2016. 172 p.
3. Sudakov, V.A. Metodologija unificirovannoj razrabotki sistem podderzhki prinjatija reshenij dlja mnogokriterial'nyh vysokorazmernyh zadach raketno-kosmicheskoy otrasli: dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.13.01, Sudakov Vladimir Anatol'evich. Moskva, 2014. 300 p.
4. Sudakov, V.A., Osipov, V.P. Unifikacija razrabotki programmnoho obespechenija prikladnyh SPPR, V.A. Sudakov, V.P. Osipov. Trudy XII Vserossijskogo soveshhanija po problemam upravlenija (VSPU 2014). M.: izd-vo IPU RAN, 2014. pp. 8855-8863.
5. Osipov, V.P., Sivakova T.V., Sudakov, V.A. Predposylki unifikacii programmnyh sredstv podderzhki prinjatija reshenij, V.P. Osipov, T.V. Sivakova, V.A. Sudakov. Programmnye produkty i sistemy. 2013. №3. pp. 147-150.
6. Software engineering. Product quality. Part 1: Quality model: ISO/IEC 9126-1:2001. Switzerland, 2001. 25 p.
7. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM. Intellektual'naja sistema podderzhki prinjatija reshenija na baze nechetkih nejronnyh setej dlja rukovoditelja tushenija pozhara na territorii ОАО «Kaliningradskogo morskogo trgovogo porta», T.S. Stankevich, A.V. Kiper. № 2013661903; zajavl. 22.10.2013; opubl. 18.12.2013, Bjul. № 12 (86).

УДК 377.022

МОРСКИЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ В МОРСКОЙ ЭКОНОМИКЕ РОССИИ В НОВЫХ УСЛОВИЯХ

Владимир Алексеевич Волкогон

кандидат экономических наук, доцент, ректор
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: rector@klgtu.ru

Наталья Анатольевна Кострикова

кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по науке
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, профессор, начальник управления инновационной деятельности,
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: yafasov@list.ru

Аннотация

Освоение ресурсов Мирового океана является одним из основных направлений развития мировой цивилизации в 21 веке с перспективными новыми рынками биопродукции, морской и офшорной энергетики и фармации, подводных производств редкоземельных элементов, скоростного морского транспорта, построенными на интеллектуальных технологиях. Целью работы является представление морских университетов на базе ведущих вузов Росморречфлота и Росрыболовства в качестве системной основы генерации морских интеллектуальных технологий в треке MariNet Национальной технологической инициативы России. Показана необходимость их модернизации в направлении предпринимательских университетов 3.0 со статусом, приравненным к национальным исследовательским университетам РФ, и новыми направлениями деятельности. Морские национальные предпринимательские университеты должны стать интеллектуальными ядрами морских кластеров, опорными университетами для экономики приморских территорий на выходах России к Мировому океану и соответствовать университетам НТИ.

Ключевые слова: морские национальные предпринимательские университеты, ресурсы Океана, биотехнологии, интеллектуальные системы и технологии, энергетика, экосистемы, умная навигация.

MARITIME ENTREPRENEURIAL UNIVERSITIES AS A SYSTEM FUNDAMENTALS OF THE GENERATION OF MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Vladimir A. Volkogon

PhD, associate professor, rector
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: rector@klgtu.ru

Nataliyad A. Kostrikova

PhD, professor, vice-rector on science
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Abdurashid Ja. Yafasov

Dr.Sci.Tech., professor, head of innovation activity department
Kaliningrad State Technical University,
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: yafasov@list.ru

Abstract

The development of the resources of the World Ocean is one of the main directions of the development of the world civilization in the 21st century with promising new markets for bioproducts, offshore and offshore energy and pharmacy, underwater production of rare earth elements, high-speed sea transport built on intelligent technologies. The aim of the work is to represent maritime universities on the basis of the leading universities of the Rosmorreshtflot and the Federal Agency for Fisheries as a systemic basis for the generation of marine intellectual technologies in the track MariNet of the National Technological Initiative of Russia. The necessity of their modernization in the direction of entrepreneurial universities 3.0 with the status equal to the national research universities of the Russian Federation and new lines of activity is shown. Maritime national entrepreneurial universities should become the intellectual nuclei of marine clusters, the main universities for the economy of coastal territories at Russia's outlets to the World Ocean and correspond to the universities of the STI.

Keywords: marine national entrepreneurial universities, Ocean resources, biotechnologies, intelligent systems and technologies, energy, ecosystems, intelligent navigation.

Введение

Великий российский флотоводец и интеллектуал адмирал С.Г. Горшков подчеркивал: «Материки — это, по существу, гигантские острова, общая площадь которых едва достигает 150 млн. кв. километров. Их окружает, связывает между собой и держит во многих отношениях (в частности, в климатическом) в постоянной зависимости Мировой океан, поверхность которого равна 350 млн. кв. километров». Океан и приморские территории играют особую роль в организации жизнедеятельности человека. Приморские территории, как показывает опыт Северных стран и стран Юго-Восточной Азии, являются драйверами роста национальных и региональных экономик, а Особые (Свободные) экономические зоны, созданные на этих территориях - подлинными локомотивами национальных экономик (Китай, Сингапур, Южная Корея и др. страны) [1]. При этом все развитые и развивающиеся страны четко осознают: будущее мировой экономики в новых знаниях, которые должны позволять разумно использовать ресурсы недр Земли и Мирового океана для устойчивого развития человечества. 8 июня каждого года отмечается Всемирный день океанов. В 2017 году он прошел под лозунгом «Наши океаны – наше будущее». Океаны вырабатывают почти половину потребляемого человеком кислорода, поглощают свыше четверти производимого им углекислого газа, играют важную роль в круговороте воды в природе, выступают важнейшим звеном климатической системы и являются источником биоразнообразия на планете.

Вовлечение ресурсов Океана в мировую экономику становится осознанной необходимостью, и технологическая интеллектуализация морехозяйственной деятельности способна решить многие проблемы человечества в XXI веке. Как отмечается в «Призыве к действиям» конференции ООН по океану [2], благополучие нынешнего и будущих поколений неразрывно связано с экологическим состоянием и продуктивностью Мирового океана. **Целью данной работы** является развитие концепции морских национальных предпринимательских университетов Российской Федерации в новой парадигме - в качестве системных интеграторов

морской науки, образования и интеллектуальных морских технологий для реализации проектов, программ Национальной технологической инициативы, цифровой экономики. Она является итогом работы авторов в качестве экспертов MariNet НТИ в течение 2015 – 2017 гг с момента создания экспертного совета, часть материалов авторов вошла в Стратегию развития и Дорожную карту MariNet и нашла отражение в публикациях [3,4,12]. Новизной данной работы является триединое рассмотрение концепции развития ведущих морских университетов России с точки зрения глобального, отраслевого и регионального контекстов. Причем во всех трех рассматриваемых контекстах морские университеты являются ответственными за инновационное развитие направлений, в котором основная роль отводится развитию человеческого капитала, использованию информационных технологий для организации конвергентного сетевого взаимодействия всех акторов экономики, улучшению качества жизни, условий ведения предпринимательской деятельности, повышению качества управления.

**1. Морские Национальные
Предпринимательские Университеты в
качестве системного интегратора морской
экономики России**

Глобальный контекст предполагает повышения эффективности использования ресурсов и возможностей Мирового океана для устойчивого развития экономики России, отраслевой контекст - развитие отраслей экономики Российской Федерации, связанных с морехозяйственной деятельностью, в первую очередь – рыбной, транспортной и оборонной. Региональный аспект обязывает морские университеты стать опорными университетами для приморских регионов России, обращая особое внимание на сложившиеся веками и перспективные с учетом новых технологий выходы страны к Мировому океану. То есть, в связи с изменением целей и задач университетов в мире, с учетом важности морехозяйственной деятельности для России, ведущие морские университеты страны должны стать не только источником профессионального образования, но и морской науки и технологий морской индустрии. Невозможна успешная

морехозяйственная деятельность страны без системного интегрированного морского образования, современное морское образование без фундаментальной науки об Океане, современная морехозяйственная деятельность без непрерывных исследований морской бионты, современное управление в морской индустрии без современных морских знаний, цифровых технологий и компетенций мореплавания. И, наконец, опыт лучших университетов мира, органически вписавшихся в концепт рыночной экономики, показывает необходимость развития триады “исследования — инновации — инвестиции” не забывая о гражданской ответственности и нравственном воспитании выпускника университета. Для морских вузов – это аксиоматическое правило в связи с особыми условиями работы в условиях повышенной ответственности и опасности.

Совершенно очевидно, реализация упомянутой триады в социальной сфере и в предпринимательстве различаются принципиально. Предприниматель имеет определенные обязательства перед своими исследователями, новаторами, заказчиками, исполнителями и инвесторами и они, эти обязательства могут быть слабо обременены нравственными канонами, но это не помешает, как показывает негативный опыт 90-х гг реализовать предпринимателю свой проект. Но применение такого подхода в социальной сфере, например, в медицине или образовании, неприемлемо. Обязательства врача – исследователя, лечащего врача перед своими пациентами и их родственниками, перед обществом не заканчивается только на формальном предоставлении медицинских услуг, а идут гораздо дальше и глубже – к ответственности перед обществом, перед будущим, - например, в части применения тех или иных методов и лекарств в лечении больных. Если в первом случае можно говорить о рынке, рыночных отношениях, то во втором во главе угла должны быть поставлены отношения общественные, этические нормы и нравственные императивы. В морских условиях, в условиях замкнутых пространств судна и длительного совместного пребывания экипажа в автономном плавании решение социальных и предпринимательских задач тесно переплетены и требуют специальной подготовки плавсостава.

Здесь следует упомянуть еще об одной типичной ошибке, допускаемой функционерами от образования, которые не видят разницы между подготовкой специалистов плавсостава рыбной и транспортной отраслей. Управление рыболовным судном по сравнению с транспортным является более сложным процессом, так как в первом случае мы имеем дело с управлением динамической системой судно поиск – трал, взаимодействие которых меняется от многих факторов: волнения в океане, степени наполнения и изменения парусности и массы трала, подводных течений, изменения положения трала относительно судна и т.д. Математическое

представление последней задачи, рассмотренное в работах [26,27] в части прогнозирования динамического поведения подводных буксируемых структур в трехмерной модели показывает всю сложность решаемых в рыболовном флоте задач.

Одним из самых важных условий успешной и безаварийной работы рыболовного судна является компетенция судоводителя и плавсостава. Что в технологии рыболовства с полным взаимопониманием с тралмастером, умение которого точно выводить трал на обнаруженный косяк рыбы по всем трем координатам под водой с учетом подводных течений, скорости и направления ветра, скорости движения судна и ряда др. факторов, влияющих на процесс траления. А затем выборка наполненного трала на палубу обеспечивая остойчивость судна и безопасность экипажа. И всё это зачастую при значительном скоплении рыбопромысловых судов в районах промысла.

Процесс управления транспортным судном более предсказуем и когда говорят о беспилотных судах, то имеют ввиду транспортировку груза из пункта А в пункт В по установленному маршруту, достаточно предсказуемым обстоятельствам, которые известны или можно смоделировать заранее, налаженной системе спутниковой и корабельной навигации, возможностью дублирования важных узлов управления судном и т.д. На рыболовном судне нет заранее установленного маршрута, есть выделенная акватория рыболовства и квоты на вылов определенных пород рыб плюс задачи по переработке улова, как правило, на борту. То есть, обеспечивается и организация производства и соблюдение технологических процессов переработки. В случае изменения погоды, команда рыболовного судна прежде чем укрыться в гавани вынуждена выбрать трал, она его не может бросить, как в силу экологических причин, так и экономических. Команда и капитан озабочены не только безопасностью мореплавания, но и обеспечением качества добыча-ваемой морской биопродукции, сохранением её товарного вида при переработке на борту и в процессе доставки продукции на берег и сдачи на переработку, либо поставку в торговую сеть, потребителю. Работа на рыболовном судне связана с гораздо большим физическим напряжением персонала в сравнении с работой на современных транспортных судах, оснащенных автоматикой и телемеханикой. Авторы не имеют цели противопоставления системы подготовки рыбаков и транспортников, все морские профессии – сложные, поэтому хотели бы обратить внимание на специфику подготовки, связанную с успешной деятельностью во всех секторах морской индустрии.

Следует отметить, что, инновационное развитие экономики последних лет в мире формулирует свои общие вызовы к подготовке кадров [5,6,25]. Это связано с цифровой

экономикой, Big Data, распределенными сетевыми системами, искусственным интеллектом [28-32]. Как отмечается в докладе московского департамента The Boston Consulting Group – целевая модель компетенций 2025 включает в себя:

- «умение критически мыслить, эффективно работать в команде и взаимодействовать с другими людьми,
- быстро адаптироваться к изменениям, принимать решения,
- самостоятельно организовывать деятельность,
- уметь работать с огромными массивами данных и прочее», включая искусственный интеллект (ИИ) [7]. А по оценкам PwC, внедрение ИИ к 2030 г. даст прирост мировому ВВП на сумму на \$15,7 трлн, - равный примерно суммарному ВВП Японии, Германии, Великобритании, Франции и Италии за весь 2017 год.

Анализ проведенный BCG совместно с партнерами - Сбербанком России, Ворлдскиллс Россия и Global Education Futures, показывает, что Россия отстает в конкуренции за место в экономике знаний. Отставание объясняется авторами исследования тремя причинами: недостаточный спрос отечественного рынка на знания, система образования не готовит кадры для экономики знаний и, наконец, не развита среда для развития и самореализации человека. Такая же ситуация сложилась в морской индустрии. Но, на наш взгляд, надо добавить к трем перечисленным причинам четвертую – непрофессиональное управление организацией образования в определенных его звеньях. Если с созданием и развитием федеральных и национальных исследовательских университетов появились определенные подвижки в направлении подготовки кадров для экономики знаний, то морехозяйственный сектор отечественной экономики до сих пор реально слабо вовлечен в этот процесс. Сегодня в России 29 национальных исследовательских университетов (НИУ) и среди них – ни одного морского.

В связи с изложенным и реализацией Национальной технологической инициативы России напрашивается очевидное решение - организовать в качестве системной основы генерации морских интеллектуальных технологий трека MariNet, с учетом лучшего зарубежного и отечественного опыта [4,8-10]. Морские Национальные Предпринимательские Университеты (МНПУ) приравняв их по статусу к НИУ. Принятие такого решения представляется принципиально важным, так как оно дает право самостоятельно разрабатывать и утверждать образовательные стандарты, при расчете финансирования учитывать достижения в образовательной, научной и инновационной деятельности МНПУ с последующей коррекцией оплаты труда. В качестве прообразов современных предпринимательских университетов

наиболее яркими являются в мире - Массачусетский технологический университет, программы инженерной подготовки которого имеют постоянный первый рейтинг среди студенческих программ [9], в России – Томский политехнический университет, ставший лучшим инженерным вузом страны в предметном рейтинге Times Higher Education в 2017 г. [10].

Если еще несколько лет назад основной задачей современной системы образования считалась подготовка человека, способного успешно работать и жить в экономике знаний, то сегодня с учетом поразительных успехов в био-, информационных технологиях, медицине и робототехнике задача образования формулируется иначе – воспитание человека, гармонично включенного в экономику мудрости, когда новые знания не ухудшают качество жизни и морской биоты, не ведут к катастрофам.

Морская экономика – особая область мировой экономики с большим и не раскрытым до конца потенциалом и требует внимательного отношения к подготовке кадров.

2. Мировой перспективный для России рынок морской экономики

Говоря о России как о государстве с самой большой территорией – 17,1 млн. кв. км, редко упоминается протяженность её морских границ. Между тем, длина береговой границы России составляет 38,8 тысяч километров и морехозяйственная деятельность должна быть всегда в фокусе государства. Очень ёмко об этом выразился флотоводец и великий мыслитель адмирал С.В. Горшков: «Совокупность средств освоения Мирового океана и средств защиты государственных интересов при рациональном их сочетании представляет собой морскую мощь государства, которая определяет способность той или иной страны использовать военно-экономические возможности океана в своих целях» [11].

Анализ показывает [12-15,34], что мировой перспективный быстрорастущий рынок морехозяйственной деятельности будет складываться из следующих основных сегментов:

- добыча биоресурсов, полезных ископаемых, включая глубоководную, с применением новых технологий;
- морские биотехнологии и пищевая продукция на основе морепродуктов;
- синтез материалов, морских объектов и экосистем;
- морская и офшорная энергетика;
- инновационное судостроение и морское машиностроение;
- морской транспорт (включая трубопроводный) и логистика;
- промышленная продукция с использованием ресурсов океана;
- пространственное планирование: приморская территория – морская акватория;
- распределенные системы управления, навигации и безопасности мореплавания;

• морское инженерное образование и наука.

Перечисленные сегменты взаимосвязаны и переплетаются друг с другом, но морское инженерное образование и наука являются системообразующей основой всех сегментов современной морской экономики. Остановимся кратко на некоторых из них, связанных с рыбной отраслью.

Примерно 3 миллиарда человек полностью зависят от Мирового океана, как основного источника белка, а его добычей и переработкой занимаются св. 200 млн человек. Свежая рыба содержит:

- 18 - 20% легкоусвояемого белка, незаменимые для питания человека аминокислоты, включая изолейцин, необходимый для синтеза гемоглобина, метионин, обеспечивающий дезинтоксикацию организма,
- фениланин, улучшающий память и способность к обучению, уменьшающий боль и влияющий на настроение и др.

По этой причине проблема эффективного и устойчивого рыболовства и рыбоводства актуальна и рыбная отрасль является важной частью мировой экономики. Объем мировой рыбодобычи по итогам 2016 года составил 101,09 млн тонн, из них 91,7% приходится на страны Азии. С учетом существующей переработки объем рыбопродукции в валовом исчислении можно оценить примерно в \$300 – 400 млрд, т.е., 10-12% ВВП морской отрасли. До 35% от общего объема рыбопереработки (примерно 35 млн тонн) составляют отходы производства, часть из которых перерабатывается в дешевую рыбную муку для подкормки животных и удобрений, часть – примерно 10% от общего объема добываемой рыбы теряется безвозвратно, нанося ущерб окружающей среде. Отсюда вопрос технологии полной и глубокой переработки морепродукции является актуальным в масштабах всего человечества.

В настоящее время в Российской Федерации разрабатывается пилотная мобильная установка по переработке рыбных отходов в высококачественные протеины в ценовом диапазоне примерно на два порядка выше стоимости рыбной муки [16]. При проектной мощности в 1 тонну рыбных отходов в сутки модуль может быть размещен в 40-футовом контейнере, что делает его весьма удобным в транспортировке и мобильным при необходимости обслуживания сети небольших рыбоперерабатывающих производств на побережье. Ориентировочный бюджет проекта \$430 тыс. Одновременно прорабатывается возможность создания пилотной установки судового размещения проектной мощностью в 50 тонн рыбных отходов в сутки. Размещенный на судне модуль позволит организовать переработку в морских условиях, обрабатывая продукцию рыболовных судов с периодическими заходами в порты для выгрузки готовой продукции в

логистические центры, либо непосредственно покупателям. Ориентировочный бюджет проекта \$8,0млн. При переработке 18000 тонн сырья в год капитальные вложения составят примерно \$4,7млн, операционные расходы – \$1,5млн, ежегодный доход (выручка) \$10 млн, что должно обеспечить окупаемость модуля примерно за 2 года. Расчеты приведены исходя из 100% загрузки модуля. Если рассматривать работу в 1 смену (береговой вариант) и загрузку в 80%, то расчеты показывают срок окупаемости в 7 лет. Следует отметить в этой связи очень важный синергетический эффект этой разработки. В мире, на предприятиях, занятых переработкой биопродукции животного происхождения, включая предприятия мясомолочной промышленности, ежегодно создается 200 млн тонн отходов при мировом дефиците животного белка для человечества св. 50 млн тонн в год. Упомянутая Hi-Tech технология позволяет создавать новые пищевые технологии и новые линии пищевых продуктов, включая функциональные продукты питания, на основе морепродукции и местной сельскохозяйственной продукции, в частности, - питание для спортсменов и лиц, испытывающих большие физические нагрузки, при различных заболеваниях, вынужденных соблюдать строгую диету – сердечнососудистых и др. социально значимых заболеваниях. Они не только расширяют сферу применения сельскохозяйственного и рыбного сырья, но и обеспечивают конкурентоспособность продукции на международном рынке. Отметим, использование Hi – Tech технологий рыбопереработки имеет глобальное значение - снижает необходимость в наращивании объемов вылова рыбы в Мировом океане и способствует альтернативному экологическому варианту устойчивого развития морехозяйственной деятельности. Создание судовых умных морских фабрик по переработке морепродукции может стать одним из перспективных направлений специального гражданского судостроения в России.

В части инновационного гражданского судостроения и морского машиностроения следует отметить расширение производства в мире специализированных судов – газозводов для перевозки сжиженного газа, для строительства (монтажа) офшорных электростанций и ветровых электростанций морского базирования, рыболовных судов с умной системой навигации и обеспечения повышенной остойчивости [17], новыми системами поиска рыбы и орудиями лова [18]. Важные результаты получены в этом направлении в России в части необходимости непрерывного контроля остойчивости судна под воздействием внешней среды (непрерывное определение параметров морского волнения и измерения высоты движения объекта, его частей над водной поверхностью) и возможных изменений внутренней среды судна (например, смещения груза) [17]. Они позволяют утверждать о создании методологии интеллектуального

судна, где ключевым конструктом для судна является понятие «стойчивости». Вычислительный блок и библиотека математических моделей, алгоритмы управления, адаптации, оценки внешних возмущений, обработки и комплексирования навигационной информации, предусматривающие подключение датчиков устойчивости судна, существенно повышают ценность НИОКР. Разработаны и реализованы гибридные методы, сочетающие преимущества реактивного (мгновенная реакция на ситуацию) и интеллектуального поведения (основано на анализе ситуации и обработке). Значительный интерес представляет разработка отечественного тренажерного комплекса траловых систем, не имеющего аналогов в мире. Сегодня он защищен 33 Свидетельствами на компьютерные программы и патентом № 2323572 «Распорная траловая доска». Проект одобрен экспертным советом (рабочей группой) MariNet для включения в целевую программу НТИ и в настоящее время проходит экспертизу проектного офиса НТИ.

Интересным направлением развития специального судостроения является восстановление отечественного железобетонного судостроения на новой технологической основе с использованием новых легких газо-фибро- и других специальных бетонов, композитных материалов и аддитивных технологий. Ж/б суда могут найти применение в качестве платформ для строительства жилья для беженцев в Европе, жителей приморских территорий в Азии и Африке, пристаней и причалов на территориях с сезонными колебаниями уровней рек и водоемов, в частности на обширных территориях равнинной России, охватываемой ежегодно весенними паводками.

Возобновляемые источники энергии являются самым быстрорастущим источником энергии в мире. По прогнозам ученых потребление энергии будет увеличиваться в среднем на 2,3% в год в ближайшие 25 лет - до 2040 года [19], а наибольший вклад в рост будет составлять офшорная и морская ветроэнергетика. Испытания и запуск плавучих крупных ВЭС в Японии (910 МВт) и Шотландии (5 x 6 МВт) показали целесообразность развития плавучих ветропарков. Тенденция снижения их стоимости еще на 40-50%, открывают новые возможности для организации подводных горнорудных предприятий по добыче ископаемых с недр дна Мирового океана. По экспертным оценкам ВЭС, установленные на шельфе, генерируют в пять раз больше энергии, по сравнению с теми, которые стоят на суше. Германия, Дания и Нидерланды создают в Северном море крупнейшую ВЭС мощностью до 100 ГВт в районе Доггер-банка – своеобразный энергетический хаб, который будет обеспечивать электроэнергией территории десятка стран, кроме стран – участников проекта Норвегия, Бельгию, Великобританию. Отметим, в этой связи, что самая крупная ВЭС расположена в

районе города Цзюцюань (провинция Ганьсу, Китай), мощностью 12,77 ГВт, которую планируется нарастить к 2020 году до 20 ГВт [20].

Развитие ветровой энергетики в приморских регионах России может оказать существенное влияние на повышение безопасности энергоснабжения, что наглядно можно продемонстрировать на примере Калининградской области. Имеющийся потенциал офшорной энергетики Балтийского побережья Калининградской области составляет 300-350 МВт и способен не только покрыть треть потребности региона в электроэнергетике, но и существенно отразиться на повышении энергобезопасности, вследствие распределенного характера парка ВЭС.

Огромным потенциалом обладает рынок информационных и аддитивных технологий. Создание универсального инструментария управления приморскими регионами, муниципалитетами и отраслями экономики, связанными с приморскими регионами в виде специализированных Ситуационных центров - систем подготовки принятия решений, непрерывного мониторинга и контроля финансово-экономической, социальной среды и среды обитания приморского территориального сообщества с учетом внутренних и внешних факторов и трендов развития – первейшая задача цифровой экономики. Использование принципов интерактивной сетевой лаборатории NBICS.NET [21] открывает принципиально новые возможности в развитии морской экономики обеспечивающей конвергентность участников (коллективная, сетевая и интерактивная работа в пределах Интернет), институтов (наука, образование, бизнес, государство, общество), различных предметных областей (априори, самые прорывные идеи и технологии возникают на стыках, пример - NBICS), а также быструю материализацию идей с помощью аддитивных технологий, открывает принципиально новые возможности в развитии морской экономики.

3. Роль морских университетов в развитии кластеров морской экономики России

На Давосском Форуме 2015 было показано, что уже к 2020 году исчезнет св.7 млн рабочих мест в административном и реальном секторах экономики, на их смену придут новые рабочие места в интеллектуальных и высокотехнологичных сферах [22]. В морехозяйственной сфере это профессии, связанные с реализацией концепций “E-Navigation”, “Smart Ship”, “Smart Port”, “Smart City”, “Smart Municipality”, “Smart Holding” и др. [21,23,24]. Всех их объединяет сеть умных устройств, аппаратно-программных комплексов, способных взаимодействовать друг с другом, с внешней средой, обрабатывать в реальном масштабе времени большие массивы данных и предлагать оптимальные решения поставленных и возникающих задач, обеспечивать безопасность жизнедеятельности.

Формируемая система подготовки кадров в парадигме МНПУ должна стать важнейшим звеном Государственной политики, формирующей единое образовательное, научное и инновационное предпринимательское пространство в морехозяйственной деятельности и развитии приморских территорий страны. МНПУ, обеспечивая выполнение всех требований Международных конвенций о подготовке и дипломировании моряков и несению вахты, по охране человеческой жизни на море, по предотвращению загрязнения с судов и других международных нормативных документов, должны соответствовать современным предпринимательским университетам США, Японии и Китая. Такие университеты необходимо создать на всех выходах России к Мировому Океану: на Дальнем Востоке – к Тихому океану, в Северно-Ледовитый океан – в Мурманске или Архангельске, в богатом морскими традициями и морскими учебными заведениями Санкт-Петербурге, в Калининграде – незамерзающем порту, обеспечивающем выход в Атлантический океан, а также на Каспии и на Черном море.

Они должны образовать распределенный Национальный морской кластер: территориально распределенные морские образовательно-проектно-производственные комплексы на выходах России к Мировому Океану с морским национальным предпринимательским университетом в качестве ядра каждого комплекса. Успех развития МНПУ видится в расширении приема на морские специальности, в модернизации и укреплении учебной и научно-производственной базы, в создании учебно-производственного флота университетов и внедрение новых информационных технологий. Весьма актуальным и важным представляется повышение качества и стоимости экспортных услуг за счет подготовки более квалифицированного, более высокооплачиваемого инженерно-технического и командного состава флота, в подготовке морских специалистов, которые будут востребованы отраслью завтра, через 5, 10 лет. От Калининградской области в недалеком прошлом в море на судах работали в среднем 25-27 тысяч человек, у которых среднегодовой доход варьировался в пределах \$25-40 тысяч. То есть, общий ежегодный доход их составлял примерно \$1 млрд, в твердой валюте - примерно четвертую - пятую часть общих доходов населения. Сегодня в море выходят 17 тысяч моряков и их доходы составляют менее шестой часть общих доходов населения региона. Однако, даже в этом случае они превышают годовой оборот всех 1463 предприятий и организаций 29,4млрд руб, относящихся к отраслям сельского хозяйства, охоты и лесного хозяйства, рыболовства и рыбоводства Калининградской области, вместе взятых, вчетверо больше оборота всех 1363 гостиниц и ресторанов региона 8,7 млрд руб и сравним с оборотом всех 6852 строительных компаний Калининградской области 34,7 млрд руб. [33, с.74-77].

Тенденция снижения доходов плавсостава, работающего по индивидуальным контрактам, продолжается, так как снижаются показатели приема на бюджетные места в КГТУ – БГАРФ по морским специальностям. То есть падает рынок высокооплачиваемых профессиональных услуг россиян на мировом рынке, падают валютные поступления в экономику российского анклавного региона и об этом мало кто задумывается из лиц принимающих решение по развитию морского образования. Между тем, Российско-Китайский Форум инноваций, прошедший в Вэйхае 6-8 сентября 2017 г показал высокую заинтересованность китайской стороны в организации обучения высшего командного состава гражданского флота в Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота КГТУ.

Морские национальные предпринимательские университеты должны быть инициаторами создания новых и развития существующих инновационных структур по жизненно важным для приморских регионов и прорывным для страны направлениям развития, быть центрами превосходства:

- ❖ по цифровым и аддитивным технологиями в морской отрасли;
- ❖ по сельскому хозяйству с использованием новых технологий и материалов;
- ❖ в рыбохозяйственном комплексе, включая рыбный промысел, аквакультуру с использованием новых технологий и кормов;
- ❖ по проектированию маломерных и малотоннажных судов с использованием новых методов расчета, проектирования, новых материалов и технологий;
- ❖ по энергоэффективности и энергетической безопасности, расширению использования альтернативных и местных источников энергии;
- ❖ по современной цифровой образовательной среде, сетевым лабораториям, ситуационным центрам «Умный порт», «Умное судно», «Умное предприятие», «Умный муниципалитет», «Умный холдинг» и т.д.;
- ❖ по биотехнологиям пищевой продукции, включая функциональные продукты питания на основе морепродукции и местной сельскохозяйственной продукции;
- ❖ по развитию финансовой грамотности населения.

Заключение

Организация Морских Национальных Предпринимательских Университетов (МНПУ) в Российской Федерации, приравненных по статусу к Национальным Исследовательским Университетам должна стать системной основой реализации Национальной Технологической Инициативы в части морехозяйственной деятельности России в XXI веке. Она обеспечит развитие морских интеллектуальных технологий с

учетом лучшего зарубежного и отечественного опыта, является фундаментом управления морской индустрией, лучшим способом включиться в современные тренды развития мировой экономики. Принятие такого решения даст возможность и право самостоятельно с опережением разрабатывать, и утверждать образовательные стандарты и программы, свободу в финансово-экономической деятельности, развитие образовательной, научной и инновационной деятельности в соответствии с лучшими традициями отечественного образования и зарубежного опыта.

Наряду с развитием образовательной и научной деятельности в области морской экономики МНПУ будут формировать культуру бережного отношения к ресурсам Океана, их воспроизводства и рационального потребления с применением новых знаний и технологических новаций. Системные исследования и мониторинг Океана позволят лучше понимать взаимосвязь между его экологическим состоянием и изменениями климата Земли, повысить эффективность систем раннего предупреждения экстремальных погодных явлений, содействовать принятию сбалансированных решений в направлении морехозяйственной деятельности и устойчивого развития приморских территорий России.

С учетом состояния реальной экономики России сферу деятельности МНПУ можно сформулировать следующим образом. Это:

- цифровые образовательно-проектные среды морских специальностей, нишевое и специальное судостроение;
- сетевые системы мореплавания, умные бортовые системы мониторинга состояния морских объектов и морская логистика,

исследования и добыча ресурсов, интеллектуальные системы управления территориально распределенными ресурсами и объектами, глобальный мониторинг и прогнозирование биоресурсов океана;

- промышленное рыболовство, добыча и переработка морской биопродукции;
- Hi-Tech в культивировании и переработке морских биоресурсов.

Необходимо выделить комплексное планирование приморских территорий и морехозяйственной деятельности как единого объекта управления, развитие интеллектуальных социально-экономических кластеров Океан – Берег, морские производственные платформы, подводные предприятия и экосистемы, влияние океана на климат Земли, управление глобальными процессами в океанической среде внешним воздействием, морская робототехника, оффшорная энергетика и подводные коммуникации.

Необходимо подчеркнуть, что создание мощных, современных морских предпринимательских университетов представляет важность для государства не только с точки зрения обеспечения устойчивости развития экономики, но и с точки зрения военно-политической – опоры её Военно-Морского Флота. Морские предпринимательские университеты органически вписываются в перспективные рынки будущего и потому представляют интерес с точки зрения развития стратегически перспективных рынков для России в морской деятельности. Они обеспечат фундамент формирования будущего страны в контексте освоения ресурсов Мирового океана и устойчивого развития приморских территорий.

Литература

1. Asian economic integration report 2015: How can special economic zones catalyze economic development? Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015, 167p.
2. Материалы конференции ООН «Сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития», Нью-Йорк, 5–9.06.2017г., A/CONF.230/11,17-08693
3. В.А.Волкогон. Роль рыбохозяйственной науки и образования в устойчивом развитии регионов России. «Образование: цели и перспективы», №48, 2017 г, Стр. 130-141.
4. Волкогон В.А., Кострикова Н.А., Яфасов А.Я. Морские предпринимательские университеты для новой экономики России. Управленческое консультирование. С-Петербург. СЗИУ РАНХ и ГС, 2013г., №4, стр.87-94.
5. Susan S. Silbey. The Fundamental Challenge Facing Higher Education Today/MIT Faculty Newsletter, Vol. XXX No. 1, September/October 2017.
6. Russia-Skills_Outline_v1.8_preview_tcm27-177753, The Boston Consulting Group Россия 2025: от кадров к талантам., доклад, октябрь 2017 г., 72 с. www.bcg.ru.
7. WBG: Digital Dividends. World Development Report, New York, 2016, 102725, 331 p. Электронный доступ: <http://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.
8. Исследовательские университеты США: механизм интеграции науки и образования / Под ред. В. Б. Супяна. М.: Магистр, 2009. 399 с.
9. Massachusetts Institute of Technology, <http://web.mit.edu/>
10. Томский политех совершил прорыв в престижном международном рейтинге вузов. Times Higher Education. 06.09.2017. Электронный доступ: <http://news.tpu.ru/news/2017/09/09/27601/>
11. С.Г. Горшков. Морская мощь государства. СПб., «Морское наследие», 2016, 472 с. ISBN 978-5-905795-11-4

12. В.А.Волкогон, Н.А.Кострикова, А.А.Меркулов, А.Я.Яфасов. MariNet - распределенные системы морехозяйственной деятельности. Блок: образование. Материалы рабочей группы. М. АСИ - КГТУ, 2015 г, 40с.
13. International Energy Agency. World Energy Outlook (WEO) 2017, 782 p.
14. Circumnavigation HELM –PwC Economy of the Sea Barometer (World) December In-depth, 2016 Edition No2, 130 p.
15. The 6 th Annual Deep Sea Mining Sammit 2017 22 - 23 May 2017 Merchant Taylors' Hall London, UK/ <http://www.deepsea-mining-summit.com/?track=DSA>
16. О.Я.Мезенова, В.В.Волков, Н.А.Кострикова, А.Я. Яфасов. Умная фабрика безотходной переработки морской биопродукции. Модульный ряд. Доклад на Китайско-Российском Форуме по инновациям, Вэйхай, Китай, 7 сентября 2017 г.
17. В. А. Бондарев, В. А. Волкогон, Ю. И. Нечаев. Оперативный контроль морских катастроф на основе конкурирующих вычислительных технологий. Морские интеллектуальные технологии, 3 (37) Т. 1, 2017, с. 96-103.
18. А. А. Недоступ., А. О. Ражев. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой, Интеллектуальные технологии в подготовке кадров для морской индустрии Морские интеллектуальные технологии, 3 (37) Т. 1, 2017, с.154-157.
19. EIA, U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2017, Report Number: DOE/EIA-0484(2017, September 14, 2017, 76 p.
20. Топ-10 крупнейших объектов альтернативной энергетики в мире. 02.05.17 <http://www.warandpeace.ru/ru/reports/view/120892/>
21. Н. А. Кострикова, А. А. Меркулов, А. Я. Яфасов Технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов. Морские интеллектуальные технологии, 3 (37) Т. 1, 2017, с.135-141.
22. С.Мануков. 4-я промышленная революция в Давосе. «Expert Online» 21 января 2016г. Эл. дост.: <http://expert.ru/2016/01/21/chetvertaya-promyishlennaya-revolyutsiya/?12016>
23. Колесников А.В., Меркулов А.А. Программный продукт "Ситуационный центр VSM Cenose"Москва, ИПИ РАН, Системы и средства информатики, 2013, том 2, стр. 221-241
24. Меркулов А.А. Автоматизация синтеза ситуационных центров на основе универсального паттерна организаций VSMCenose. Калининград. Вестник Балтийского федерального университета им. Канта. 2016. № 3. стр.68-80
25. Лукша П., Песков В. Будущее образования: глобальная повестка. Skoltech – Сколковский институт науки и технологий, АСИ - Агентство стратегических инициатив, М., 2015, 208 с.
26. Vineet Kumar Srivastava, YVSS Sanyasiraju, Mohammad Tamsir. Dynamic Behavior of Underwater Towed-cable in Linear Profile. Int. Journal of Scientific & Engineering Research. 2011. V. 2, No. 7. P. 1-10.
27. В. А. Наумов. Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов. Интеллектуальные технологии в подготовке кадров для морской индустрии Морские интеллектуальные технологии, 3 (37) Т. 1, 2017, с.158-162.
28. Цифровая экономика: глобальные тренды и практика российского бизнеса. М. НИУ ВШЭ, 2017г., 121 с.
29. Цифровое правительство 2020 Перспективы для России. ВБ, проект для обсуждения, М. апрель 2017г., 79 с.
30. World Bank. 2016. World Development Report 2016: Digital Dividends. Washington, 359p. <http://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.
31. United Kingdom. Digital Economy Act 2017.
32. Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е.В., Яфасов А.Я., Платформа синтеза индивидуальных и системы распределенных ситуационных центров. Сборник тезисов «Всероссийский форум «Система распределенных ситуационных центров как основа цифровой трансформации государственного управления» СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2017.
33. Калининградская область в цифрах, 2016. Краткий статистический сборник, ТО ФСГС по Калининградской области, официальное издание, Калининград, 2016, 137 с. Электронный доступ: <http://www.kaliningrad.gks.ru>
34. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2017, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017.

References

1. Asian economic integration report 2015: How can special economic zones catalyze economic development? Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015, 167p.
2. Materialy konferencii OON «Sohranenie i racional'noe ispol'zovanie okeanov, morej i morskikh resursov v interesah ustojchivogo razvitiya», N'ju-Jork, 5–9.06.2017g., A/CONF.230/11,17-08693
3. V.A.Volkogon. Rol' rybohozjajstvennoj nauki i obrazovaniya v ustojchivom razvitiie regionov Rossii. «Образование: цели и перспективы», №48, 2017 г, Str. 130-141.
4. Volkogon V.A., Kostrikova N.A., Jafasov A.Ja. Morskie predprinimatel'skie universitety dlja novoj jekonomiki Rossii. Upravlencheskoe konsul'tirovanie. S-Peterburg. SZIU RANH i GS, 2013g., №4, str.87-94.
5. Susan S. Silbey. The Fundamental Challenge Facing Higher Education Today/MIT Faculty Newsletter, Vol. XXX No. 1, September/October 2017.
6. Russia-Skills_Outline_v1.8_preview_tcm27-177753, The Boston Consulting Group Rossija 2025: ot kadrov k talantam., doklad, oktjabr' 2017 g., 72 s. www.bcg.ru.

- 7.WBG: Digital Dividends. World Development Report, New York, 2016, 102725, 331 p. Jelektronnyj dopusk: <http://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.
- 8.Issledovatel'skie universitety SShA: mehanizm integracii nauki i obrazovanija / Pod red. V. B. Supjana. M.: Magistr, 2009. 399 s.
9. Massachusetts Institute of Technology, <http://web.mit.edu/>
10. Tomskij politeh sovershil proryv v prestizhnom mezhdunarodnom rejtinge vuzov. Times Higher Education. 06.09.2017. Jelektronnyj dostup: <http://news.tpu.ru/news/2017/09/09/27601/>
11. S.G. Gorshkov. Morskaja moshh' gosudarstva. SPb., «Morskoe nasledie», 2016, 472 s. ISBN 978-5-905795-11-4
12. V.A.Volkogon, N.A.Kostrikova, A.A.Merkulov, A.Ja.Jafasov. MariNet - raspredelennye sistemy morehozajajstvennoj dejatel'nosti. Blok: obrazovanie. Materialy rabochej grupy. M. ASI - KG TU, 2015 g, 40s.
13. International Energy Agency. World Energy Outlook (WEO) 2017, 782 p.
14. Circumnavigation HELM –PwC Economy of the Sea Barometer (World) December In-depth, 2016 Edition No2, 130 p.
15. The 6 th Annual Deep Sea Mining Sammit 2017 22 - 23 May 2017 Merchant Taylors' Hall London, UK/ <http://www.deepsea-mining-summit.com/?track=DSA>
- 16.O.Ja.Mezenova, V.V.Volkov, N.A.Kostrikova, A.Ja Jafasov. Umnaja fabrika bezothodnoj pererabotki morskoi bioprodukcii. Modul'nyj rjad. Doklad na Kitajsko-Rossijskom Forume po innovacijam, Vjejhaj, Kitaj, 7 sentjabrja 2017 g.
17. V. A. Bondarev, V. A. Volkogon, Ju. I. Nechaev. Operativnyj kontrol' morskikh katastrof na osnove konkurirujushhijh vychislitel'nyh tehnologii. Morskije intellektual'nye tehnologii, 3 (37) T. 1, 2017, s. 96-103.
18. A. A. Nedostup., A. O. Razhev. Matematicheskaja model' vzaimodejstvija raspornoj tralovoj doski s vodnoj sredoj, Intellektual'nye tehnologii v podgotovke kadrov dlja morskoi industrii Morskije intellektual'nye tehnologii, 3 (37) T. 1, 2017, s.154-157.
19. EIA, U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2017, Report Number: DOE/EIA-0484(2017, September 14, 2017, 76 p.
20. Top-10 krupnejshih ob#ektov al'ternativnoj jenergetiki v mire. 02.05.17 <http://www.warandpeace.ru/ru/reports/view/120892/>
21. Kostrikova N.A. Merkulov A.A., Jafasov A.Ja. Intellektual'nye tehnologii v podgotovke kadrov dlja morskoi industrii. Sankt-Peterburg. Morskije intellektual'nye tehnologii. Izd-vo "Nauchno-issledovatel'skij centr "Morskije tehnologii"" Nauchnyj zhurnal. №3(37). T.1. 2017 g. str.109- 118. 24. N. A. Kostrikova, A. A. Merkulov, A. Ja. Jafasov Tehnologija sinteza raspredelennyh intellektual'nyh sistem upravlenija kak instrument ustojchivogo razvitija territorij i slozhnyh ob#ektov. Morskije intellektual'nye tehnologii, 3 (37) T. 1, 2017, s.135-141.
22. S.Manukov. 4-ja promyshlennaja revoljucija v Davose. «Expert Online» 21 janvarja 2016g. Jel. dost.: <http://expert.ru/2016/01/21/chetvertaya-promyshlennaya-revoljuciya/?12016>
23. Kolesnikov A.V., Merkulov A.A. Programmnyj produkt "Situacionnyj centr VSM Cenose" Moskva, IPI RAN, Sistemy i sredstva informatiki, 2013, tom 2, str. 221-241
- 24 Merkulov A.A. Avtomatizacija sinteza situacionnyh centrov na osnove universal'nogo patterna organizacij VSMCenose. Kaliningrad. Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. Kanta. 2016. № 3. str.68-80
- 25.Luksha P., Peskov V. Budushhee obrazovanija: global'naja povestka. Skoltech – Skolkovskij institut nauki i tehnologii, ASI - Agentstvo strategicheskijh inicijativ, M., 2015, 208 s.
26. Vineet Kumar Srivastava, YVSS Sanyasiraju, Mohammad Tamsir. Dynamic Behavior of Underwater Towed-cable in Linear Profile. Int. Journal of Scientific & Engineering Research. 2011. V. 2, No. 7. P. 1-10.
- 27.V. A. Naumov. Sily gidrodinamicheskogo soprotivlenija gibkijh svjazej buksiruemyh podvodnyh ob#ektov. Intellektual'nye tehnologii v podgotovke kadrov dlja morskoi industrii Morskije intellektual'nye tehnologii, 3 (37) T. 1, 2017, s.158-162.
- 28.Cifrovaja jekonomika: global'nye trendy i praktika rossijskogo biznesa. M. NIU VShJe, 2017g.121 s.
29. Cifrovoe pravitel'stvo 2020 Perspektivy dlja Rossii. VB, proekt dlja obsuzhdenija, M. aprel' 2017g., 79 s.
30. World Bank. 2016. World Development Report 2016: Digital Dividends. Washington, 359r. <http://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.
31. United Kingdom. Digital Economy Act 2017.
32. Majtakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Jafasov A.Ja., Platforma sinteza individual'nyh i sistemy raspredelennyh situacionnyh centrov. Sbornik tezisev «Vserossijskij forum «Sistema raspredelennyh situacionnyh centrov kak osnova cifrovoj transformacii gosudarstvennogo upravlenija» SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2017.
- 33.Kaliningradskaja oblast' v cifrah, 2016. Kratkij statisticheskij sbornik, TO FSGS po Kaliningradskoj oblasti, oficial'noe izdanie, Kaliningrad, 2016, 137 s. Jelektronnyj dostup: <http://www.kaliningrad.gks.ru>
34. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2017, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Кузин Владимир Иванович

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры отраслевых и корпоративных финансов
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: vladimir.kuzin@klgtu.ru

Харин Александр Геннадьевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры отраслевых и корпоративных финансов
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

Аннотация

Управление рыбохозяйственным комплексом как на уровне отдельных предприятий, так и всей отрасли в целом – сложная задача, решение которой традиционными методами часто оказывается неэффективным. Нестабильность экономических условий, комплексный характер рыбохозяйственной деятельности, ее зависимость от природных факторов затрудняют принятие оптимальных управленческих решений. На деятельность рыбного хозяйства оказывают сильное влияние стейкхолдеры, часто имеющие разнонаправленные интересы. В связи с этим необходим поиск новых подходов к проектированию систем управления рыбохозяйственным комплексом. Одним из таких подходов к управлению отраслью является использование методологии и инструментария теории нечетких множеств. В статье предложен алгоритм построения системы принятия управленческих решений на основе данной методологии, рассмотрен пример его применения. Делается вывод, что использование нечетко-множественного подхода может стать довольно простым и надежным способом решения проблемы управления системами рыбохозяйственного комплекса в условиях неполноты и неопределенности информации.

Ключевые слова: рыбохозяйственный комплекс, стейкхолдеры, стратегия, система принятия управленческих решений, методология управления, алгоритм управления, нечетко-множественный подход, метод анализа иерархий.

THE METHOD OF MANAGEMENT OF FISHERIES ECONOMY IN INCOMPLETE AND UNCERTAINTY OF INFORMATION

Vladimir I. Kuzin

Ph.D., associate professor of department of branch and corporate finance
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vladimir.kuzin@klgtu.ru

Aleksandr G. Kharin

Ph.D., associate professor of department of branch and corporate finance
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: aleksandr.harin@klgtu.ru

Abstract

Management of fisheries both at the level of enterprises and the entire industry as a whole is complicated problem which solution using traditional methods is often ineffective. The instability of economic conditions, the complex nature of fisheries and the strong dependence on natural factors make it very difficult to adopt optimal solutions for the management of the industry. The activity of the fishing industry takes place in the context of the multidirectional interests of the stakeholders. Therefore, it is necessary to search for new approaches to the control system design of fishery industry. One such an approach is the use of the methodology and tools of the fuzzy sets theory. The article proposes an

algorithm for constructing a system of management and gives an example of its application. It is concluded that the application of the fuzzy-sets approach can become a way to solve the problem of managing fisheries in conditions of incompleteness and uncertainty.

Key words: fisheries, stakeholders, management decision-making system, management methodology, management algorithm, fuzzy-sets approach, AHP method.

Введение

Высокая волатильность современной экономики в полной мере проявляется в рыбохозяйственном комплексе, деятельность которого происходит в условиях переплетения экономических и неэкономических факторов, эффектов, интересов и критериев. Отчасти эту проблему удастся решить в рамках программно-целевого метода, хотя даже программное управление не всегда эффективно [6, 7]. Это обуславливает актуальность поиска и внедрения в отрасли новых технологий, позволяющих снизить неопределенность и субъективность при принятии управленческих решений. Перспективным для решения указанной проблемы может стать использование методологии и практических наработок теории нечетких множеств. Методы этой теории предоставляют довольно широкие возможности для анализа сложных и многоаспектных социально-экономических процессов, которые характерны для рыбного хозяйства.

1. Методологический подход к решению проблемы

Основы теории нечетких множеств были заложены в одной из работ профессора Калифорнийского университета Л.А.Заде, опубликованной более полувека назад [1]. Последовавшие затем многочисленные исследования значительно расширили область применения этой теории, в том числе, был разработан ряд приложений для решения экономических задач. Ее преимуществом по сравнению с традиционным для экономического анализа бинарным подходом является возможность использования качественных оценок, хорошо отражающих весь спектр отношений, возникающих в процессе управления социально-экономическими системами. Методология теории нечетких множеств позволяет формализовать присущие обычному мышлению субъективные суждения с тем, чтобы затем оперировать ими как точными величинами. Наиболее значимый вклад в развитие теории нечетких множеств применительно к решению экономических задач внесли работы Дж. Бакли [2, 3], А.М. Хил Лафуэнте [4], Х. Циммермана [5]. Среди работ отечественных авторов, исследующих финансово-экономические аспекты применения данного подхода, выделяются труды А.О. Недосекина [10]. В настоящее время экономические приложения этой теории образуют отдельное направление в экономической науке. Его методические

наработки позволяют решать сложные экономические задачи, одной из которых может стать построение системы управления развитием рыбохозяйственного комплекса (как всего в целом, так и его отдельных частей), интегрирующей в контур управления широкий набор экономических и неэкономических параметров.

Особенности управления рыбохозяйственным комплексом обусловлены значительным числом взаимосвязанных видов экономической деятельности и большим разнообразием факторов, определяющих его развитие [11]. Это определяет большую вариативность, особенно заметную в случае инвестиций, когда целый ряд параметров носит характер качественных суждений, в том числе многовариантных оценок развития ситуации в будущем [9]. В рассматриваемых условиях методология нечетких множеств может стать альтернативой традиционным способам минимизации неопределенности. По сравнению с детерминированными и стохастическими методами преимуществом нечеткой логики является ее относительная нетребовательность к полноте и детализации исходных данных, возможность находить оптимальные решения в ситуации конфликта интересов стейкхолдеров.

Многоаспектность деятельности рыбохозяйственных систем приводит к тому, что для оперативного управления ими часто применяют модели, сфокусированные на текущих операциях, например рассматривающих производственные цепочки как бизнес-процессы [8]. При этом остается открытым вопрос управления бизнесом, ориентированным на новые технологии и виды ресурсов. Возможным выходом является признание факта, что поскольку ряд параметров рыбохозяйственных систем, не допускает точного измерения, в оценке результатов управляющего воздействия на них должна присутствовать субъективная составляющая, выраженная в виде нечетких суждений – лингвистических переменных, преобразуемых затем в количественные оценки посредством функций принадлежности. При этом функцию принадлежности не следует трактовать в строго вероятностном смысле, поскольку степень принадлежности элемента к нечеткому подмножеству может иметь и нестатистическую природу [12, с. 62].

2. Предлагаемый алгоритм управления

Рассмотрим задачу разработки оптимальной стратегии управления экономической системой рыбохозяйственного комплекса в условиях

неопределенности (в качестве такой системы могут выступать отдельные предприятия, группы компаний, территориальные комплексы и т.д.). Предлагаемый подход к решению задачи описывается следующей моделью. Пусть имеется множество $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ вариантов стратегии управления, приводящих к изменению состояния системы, множество $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ критериев, на основании которых оценивается состояние системы при различных вариантах стратегии и множество $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ мнений экспертов, выполняющих оценку вариантов по этим критериям. Суть задачи состоит в синтезе глобального нечетко выраженного критерия $\mu_C(v)$, обобщенно характеризующего состояние системы и определения оптимального по этому критерию варианта стратегии: $\mu_C(v_{opt}) = \max_v \mu_C(v)$

Задача решается путем выполнения ряда процедур в рамках нечетко-множественного подхода, например, на основе метода Беллмана-Заде [13] или др. В их числе:

- формулировка атрибутов выбора – системы целей, ограничений, критериев и других параметров, конкретизирующих содержание понятия «состояние системы»;
- разработка альтернативных вариантов стратегии, описывающих действия по изменению заданных атрибутов;
- фаззификация – генерирование лингвистических переменных и построение нечетких многоатрибутных оценочных функций;
- декомпозиция сложносоставной и многокритериальной задачи выбора оптимальной стратегии на элементарные задачи, имеющие простые решения и явно измеримые результаты;
- оценка и ранжирование альтернатив, допускающие обоснованный выбор наилучшей.

Системы рыбохозяйственного комплекса, как правило, относятся к классу смешанных эколого-социально-экономических систем. Важную роль в выборе оптимальной стратегии управления такими системами играет процедура конструирования функций принадлежности. Учитывая отмеченную выше специфику рыбохозяйственной деятельности, целесообразно использовать в качестве основы для конструирования оценочных функций один из хорошо зарекомендовавших себя методов системного подхода – метод анализа иерархий (АНР method).

В рамках метода АНР функции принадлежности формируются на основе экспертных оценок – суждений экспертов, оценивающих показатели системы с помощью сбалансированного набора количественных и качественных критериев, характеризующих влияние каждой из альтернативных стратегий на состояние управляемой системы. Поскольку критерии оценки разнородны, оценка выполняется путем лингвистической аппроксимации нечетких чисел, образующих

терм-множество. Лингвистическим переменным приписываются числовые значения – оценки степени соответствия, представляющие собой нечеткие подмножества множества с областью допустимых значений $[0, 1]$, где 0 и 1 характеризуют низшую и высшую степени принадлежности, соответственно. Обобщенное мнение экспертов об альтернативных стратегиях V_1, \dots, V_p , результатом которых является изменение состояния системы по атрибутам A_1, \dots, A_n отображается в виде матрицы размера $p \times n$:

	A_1	A_2	A_n
1	Y_{11}, Y_{11j}, \dots $, Y_{11m}$	Y_{12}, Y_{12j}, \dots $, Y_{12m}$	Y_{1n}, Y_{1nj}, \dots $, Y_{1nm}$
	Z_{11}, Z_{11j}, \dots $, Z_{11m}$	Z_{12}, Z_{12j}, \dots $, Z_{12m}$	Z_{1n}, Z_{1nj}, \dots $, Z_{1nm}$
	Y_{21}, Y_{21j}, \dots $, Y_{21m}$	Y_{22}, Y_{22j}, \dots $, Y_{22m}$	Y_{2n}, Y_{2nj}, \dots $, Y_{2nm}$
2	$Z_{21},$ Z_{21j}, \dots, Z_{21m}	Z_{22}, Z_{22j}, \dots $, Z_{22m}$	$Z_{2n},$ Z_{2nj}, \dots, Z_{2nm}
	\dots	\dots	\dots
	Y_{p1}, Y_{p1j}, \dots $, Y_{p1m}$	Y_{p2}, Y_{p2j}, \dots $, Y_{p2m}$	Y_{pn}, Y_{pnj}, \dots $, Y_{pnm}$
p	Z_{p1}, Z_{p1j}, \dots $, Z_{p1m}$	Z_{p2}, Z_{p2j}, \dots $, Z_{p2m}$	Z_{pn}, Z_{pnj}, \dots $, Z_{pnm}$

где Y_{pnm} – лингвистическая оценка m -го эксперта степени влияния p -й альтернативы на n -й атрибут; Z_{pnm} – оценка значимости (веса) n -го атрибута при выборе p -й альтернативы по мнению m -го эксперта.

Каждая из лингвистических переменных Y_{pnm} , описывающих влияние стратегий на атрибуты, соответствует одному из значений базового терм-множества $T(X)$, т.е. $Y_{pnm} \in T(X) \forall p, n, m$. Поэтому они могут быть замещены на соответствующие значения степени принадлежности $\mu(x)$, согласно принятой шкале чисел $Y_{pnm} \leftrightarrow \mu(x) | \mu(x) \in \{0, \dots, 1\}$. В качестве оценки альтернатив V_1, \dots, V_p воспользуемся комбинацией нечетких оценок по атрибутам C_1, \dots, C_n , сделанных m экспертами:

$$\mu_{pn}(x) = \tilde{z}_{pn1}\mu_{pn1}(x) + \tilde{z}_{pn2}\mu_{pn2}(x) + \dots + \tilde{z}_{pnm}\mu_{pnm}(x)$$

, где $\tilde{z}_{pni} = \frac{z_{pni}}{\sum_{i=1}^n z_{pni}} \rightarrow \sum_{i=1}^n \tilde{z}_{pni} = 1$. Тогда итоговая оценка каждого альтернативного решения, приводящего к изменению состояния системы, рассчитывается:

$$\mu_p(x) = \tilde{z}_{p1}\mu_{p1}(x) + \tilde{z}_{p2}\mu_{p2}(x) + \dots + \tilde{z}_{pm}\mu_{pm}(x), \text{ где } \tilde{z}_{pi} = \frac{z_{pi}}{\sum_{i=1}^m z_{pi}} \rightarrow \sum_{i=1}^m \tilde{z}_{pi} = 1.$$

Предлагаемый алгоритм позволяет ранжировать альтернативные стратегии, избегая довольно сложных для практического применения процедур вероятностного анализа [14]. Преимуществом алгоритма также является простота его формализации и автоматизации в рамках цифровой экономики, в части реализации интеллектуальной системы поддержки управленческих решений.

3. Апробация методики

В качестве примера, демонстрирующего применение предложенной методики,

рассмотрим прикладную задачу многокритериального выбора оптимальной стратегии развития рыбохозяйственного предприятия. Собственникам предприятия, специализирующегося в области добычи и первичной переработки рыбных ресурсов, имеющего в своем распоряжении природные активы, обладающего многолетним опытом работы в отрасли и репутацией на рынке, необходимо сделать выбор в пользу одного из альтернативных вариантов дальнейшего развития. При этом сценарий status quo (отказ от изменений) не рассматривается, поскольку он не отвечает интересам собственников и ведет к ухудшению общественного благосостояния. Специалистами предприятия предлагаются три варианта стратегии:

- техническое перевооружение в рамках текущей специализации, модернизация флота и внедрение новых технологий, обеспечивающих стабильность рыбодобычи и некоторое снижение издержек (альтернатива v_1); данная стратегия требует минимальных организационно-структурных преобразований и инвестиций, обеспечивает сохранение рабочих мест и заработков работников (положительный социальный эффект), но генерирует наименьший чистый денежный поток (низкий экономический эффект);

- усиление рыбоперерабатывающего сегмента и развитие производственной инфраструктуры – строительство новых производственных мощностей (v_2); реализация этой стратегии потребует наибольшего объема инвестиций, сопряжена с дополнительными негативными экологическими эффектами, однако привлекательна коммерчески;

- стратегическая реструктуризация, предусматривающая смену специализации на аквакультурное производство (v_3); вариант привлекателен с экологической точки зрения, однако имеет высокие технологические и коммерческие риски.

Предполагается, что результатом стратегии должен стать рост благосостояния стейкхолдеров (собственники, работники, жители района, государство в лице федеральных, региональных и муниципальных органов власти). Задача выбора оптимальной стратегии осложнена разнонаправленностью целей стейкхолдеров, ограниченностью доступных ресурсов, приверженностью собственников компании принципам социальной ответственности, а также неполнотой информации, необходимой для прогнозирования. Поиск оптимального варианта состоит в декомпозиции проблемы и ее представлении в виде трехуровневой иерархии. Фокус этой иерархии образует глобальная цель деятельности предприятия – максимизация благосостояния стейкхолдеров. Второй уровень составляют обобщенные критерии, конкретизирующие понятие «благосостояние» в

трех основных аспектах: экономическом, социальном и экологическом (g_1, g_2, g_3 , соответственно). На нижнем уровне находятся частные критерии, непосредственно измеряющие ожидаемые количественные и качественные результаты стратегий. Такая группировка исключает конкуренцию между критериями и делает возможным выбор вариантов по всем трем аспектам благосостояния одновременно.

В качестве частных критериев, оценивающих многоаспектную деятельность предприятия, предлагаются:

- показатель экономической добавленной стоимости – EVA, характеризующий изменение благосостояния собственников (e_1);

- индекс доходности инвестиций – CFROI, связывающий эффективность инвестиций в бизнес с его способностью генерировать денежные средства (e_2);

- устойчивость бизнеса к коммерческим рискам, оцениваемая обобщенным показателем уровня финансовых, производственно-экономических, социально-политических, природных и других рисков (e_3);

- генерируемый предприятием бюджетный эффект, определяемый как ожидаемая средняя годовая сумма налогов и обязательных платежей предприятия (e_4);

- прямые социальные эффекты, выражающиеся в количестве рабочих мест на предприятии и в смежных организациях (e_5), а также в прогнозируемой величине доходов работников предприятия (e_6);

- косвенный социальный эффект, характеризующий влияние деятельности предприятия на социальную среду, качество жизни в регионе и т.п. (e_7);

- экологические эффекты, отражающие воздействие предприятия на природную среду, характеризующее суммарной среднегодовой величиной сбросов, выбросов и размещения не утилизируемых отходов производства (e_8), а также качественной характеристикой воздействия на объекты биоразнообразия (e_9).

Перечисленные критерии выступают индикаторами, измеряющими влияние каждого из вариантов стратегии на конечное состояние предприятия и, следовательно, в конечном счете, указывающими на то, как эта стратегия повлияет на благосостояние стейкхолдеров. Оценки, отражающие основные ожидаемые результаты реализации альтернативных стратегий приведены в табл. 1.

Величины показателей, соответствующих критериям e_1, e_2, e_4, e_6, e_8 приняты на основании технической документации и финансово-экономических обоснований. Критерии e_3, e_7, e_9 представляют собой мнения экспертов, полученные путем

Таблица 1

Оценка стратегий на основе частных критериев

Показатели	Критерии		Ранжирование альтернатив
	Количественная оценка	Лингвистическая оценка	
1	2	3	4
EVA, млн. руб. (e ₁)	более 12	очень высокая	v ₂
	от 8,5 до 12	высокая	
	от 6 до 8,5	средняя	v ₁
	от 3 до 6	низкая	v ₃
	менее 3	очень низкая	
CFROI, % (e ₂)	более 30	очень высокая	
	от 24 до 30	высокая	v ₁ ; v ₂
	от 14 до 24	средняя	v ₃
	от 7 до 17	низкая	
	менее 7	очень низкая	
Устойчивость к рискам (e ₃)	Значения критерия оцениваются качественно	очень высокая	
		высокая	v ₂
		средняя	v ₁
		низкая	v ₃
		очень низкая	
Сумма налогов, млн. руб. в год (e ₄)	более 60	очень высокая	v ₂
	от 42 до 60	высокая	
	от 30 до 42	средняя	v ₁
	от 15 до 30	низкая	
	менее 15	очень низкая	v ₃
Численность занятых, чел. (e ₅)	более 100	очень высокая	v ₁
	от 79 до 100	высокая	
	от 46 до 79	средняя	v ₃
	от 25 до 56	низкая	v ₂
	менее 25	очень низкая	
Зарплата работников, тыс. руб. в год (e ₆)	более 600	очень высокая	
	от 480 до 600	высокая	v ₂
	от 360 до 480	средняя	v ₁
	от 240 до 360	низкая	v ₃
	менее 240	очень низкая	
Влияние на социальную среду (e ₇)	Значения критерия оцениваются качественно	очень сильное	v ₃
		сильное	
		умеренное	v ₁
		слабое	v ₂
		очень слабое	
Объем отходов, выбросов, тыс. м ³ в год (e ₈)	более 12	очень высокий	v ₂
	от 9,5 до 12	высокий	
	от 5,5 до 9,5	средний	
	от 3 до 5,5	низкий	v ₁
	менее 3	очень низкий	v ₃

1	2	3	4
Влияние на объекты биоразнообразия (e ₉)	Значения критерия оцениваются качественно	очень сильное	
		сильное	v ₂
		умеренное	v ₁
		слабое	
		очень слабое	v ₃

неформального анализа информации по соответствующим аспектам деятельности предприятия. Для обеспечения сопоставимости все критерии выражены в виде нечетких термов. В итоговом столбце табл. 1 выполнено ранжирование универсального множества альтернативных стратегий $V = \{v_k\}$ по нечеткому множеству критериев $\tilde{E} = \{e_n\}$. Результатом ранжирования является матрица степеней принадлежности каждой альтернативы v множеству \tilde{E} , выраженных числами в диапазоне {0, 1}. Классификатор, по которому выполнена фаззификация, приведен в табл. 2. Матрица степеней принадлежности стратегий нечеткому множеству критериев оценки приведена в табл. 3.

Таблица 2

Классификатор лингвистических переменных для оценки альтернативы

Лингвистическая переменная	$\mu_e(v_k)$
Очень высокое (значение), очень сильное (влияние)	1
Высокое (значение), сильное (влияние)	0,75
Среднее (значение), умеренное (влияние)	0,5
Низкое (значение), слабое (влияние)	0,25
Очень низкое (значение), очень слабое (влияние)	0

Таблица 3

Матрица степеней принадлежности альтернатив

0,5	0,75	0,5	0,5	1	0,5	0,5	-0,25	-0,5
1	0,75	0,75	1	0,25	0,75	0,25	-1	-0,75
0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25	1	0	0

Примечание: для экологических критериев использованы отрицательные оценки.

Конструирование функций принадлежности интегрального показателя «Благосостояние стейкхолдеров» выполнено путем построения матриц значимости обобщенных и частных критериев (таблицы 4 и 5). Координаты собственных векторов $w(g_m)$ и $w(c_n)$ соответствующих матриц парных сравнений дают информацию о степенях принадлежности критериев.

Таблица 4

Оценка обобщенных критериев

	g_1	g_2	g_3	$w(g_1, g_2, g_3)$
g_1	1	2	2	0,5
g_2	1/2	1	1	0,25
g_3	1/2	1	1	0,25

Таблица 5

Оценка частных критериев

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	$w(e_1, \dots, e_9)$
e_1	1	2	3	4						0,45
e_2	1/2	1	2	3						0,29
e_3	1/3	1/2	1	2						0,17
e_4	1/4	1/3	1/2	1						0,09
e_5					1	3	5			0,64
e_6					1/3	1	2			0,24
e_7					1/5	1/2	1			0,12
e_8								1	3	0,75
e_9								1/3	1	0,25

В итоге сформирован глобальный вектор приоритетов критериев W , измеряющий степень влияния частных критериев на итоговый показатель, характеризующий благосостояние. Вектор получен умножением весов критериев первого уровня иерархии на веса соответствующих им критериев второго уровня: $W = w(g_m, e_n) \times w(e_n, v_k)$; $m=1,2,3$; $n=1,2, \dots, 9$; $k=1,2,3$, и, в нашем случае, имеет вид: $W=(0.23, 0.15, 0.09, 0.05, 0.16, 0.06, 0.03, 0.19, 0.06)$.

Завершающим шагом является процедура дефаззификации, в ходе которой матрица степеней принадлежности альтернатив нечеткому множеству критериев (табл. 3) умножается на вектор-столбец глобальных приоритетов критериев W . Полученный вектор приоритета альтернатив содержит четкую информацию о преимуществе варианта с точки зрения его влияния на благосостояние стейкхолдеров. В рассматриваемом примере итоговый вектор приоритета (0.41, 0.30, 0.29)

указывает, что при заданных условиях наилучшим является вариант технико-технологического перевооружения, не предусматривающий изменение профиля деятельности предприятия.

Заключение

Приведенный пример показывает, что нечетко-множественный подход позволяет, избегая сложные и трудно интерпретируемые расчеты, принимать обоснованные решения по управлению предприятиями. Следует, однако, отметить, что имеется ряд недостатков, ограничивающих его применение. Во-первых, подход основывается на субъективном мнении и оценках экспертов. Несколько нивелировать этот недостаток может включение в предлагаемую модель алгоритма проверки согласованности оценок. Однако такая мера позволяет устранить только явные, в основном, технические ошибки, и не меняет субъективной сущности процедуры оценивания. Во-вторых, результаты сильно зависят от содержания, вкладываемого в понятие благосостояние стейкхолдеров. Приоритетность компонентов этого понятия – результат соглашения между стейкхолдерами, носящего преимущественно неэкономический характер. Любой пересмотр соотношения между компонентами благосостояния приводит к существенному изменению результатов. В частности, в нашем примере повышение степени приоритета экономических критериев с оценки «важнее» на «значительно важнее» делает более выгодной альтернативу v_2 . В-третьих, изложенный подход не дает ответ на вопрос: какова абсолютная величина изменения благосостояния. В силу этого, область применения подхода ограничена кругом задач динамического управления, не ставящих целью непосредственное измерение уровня благосостояния, а лишь использующих некоторые его аспекты в качестве критериев управления.

Вместе с тем, применение методологии нечетко-множественного подхода, может стать довольно простым и надежным способом решения проблемы управления системами рыбохозяйственного комплекса в условиях неполноты и неопределенности информации.

Литература

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzy Sets and Systems. №1. 1978. Pp. 3-28.
2. Buckley J. Solving fuzzy equations in economics and finance // Fuzzy Sets & Systems. №48. 1992. Pp. 298-296.
3. Buckley J. The Fuzzy Mathematics of Finance // Fuzzy Sets & Systems. №21. 1987. pp. 257-273.
4. Хил Лафуенте А.М. Финансовый анализ в условиях неопределенности. Минск, Тэхнолoгiя, 1998. 150 с.
5. Zimmerman H. Fuzzy Sets Theory and Its Applications. KluwerAcademicPublishers. 2001. 315 p.
6. Волкогон В.А., Кузин В.И. Целевое программирование и инвестиции в основной капитал рыбопромышленного комплекса // Балтийский экономический журнал. 2016. №2(16). С. 47-54
7. Волкогон В.А., Сергеев Л.И. Программно-целевые воспроизводственные пропорции развития рыбохозяйственного комплекса страны // Рыбное хозяйство. 2016. №3. С.16-22
8. Корнева О.В., Мнацаканян А.Г. Совершенствование бизнес-процессов предприятий рыбной отрасли // Финансовая аналитика. 2014. №7(193). С. 26-31

9. Корякина А.В., Мнацакян А.Г., Теплицкий В.А. Инвестиционные ресурсы рыбохозяйственного комплекса (на примере рыбохозяйственного комплекса Калининградской области) (монография). Калининград. Изд-во ФГБОУ ВП «КГТУ», 2014.-98с.
10. Недосекин А.О. Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний / дисс. д.э.н. по спец. 08.00.13 «Математические и инструментальные методы в экономике». СПб.СПбГЭиФ. 2003. 280 с.
11. Теплицкий В. А., Мнацакян А. Г., Корякина А. В. Основные пути развития рыбохозяйственного комплекса России и Калининградской области //Балтийский экономический журнал. 2016. №1(13). С. 147-154
- 12.Халов Е.А. Систематический обзор четких одномерных функций принадлежности интеллектуальных систем // Информационные и вычислительные системы. 2009. №3. С. 60-74
- 13.Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных значений. М.: Мир. 1976. 165 с.
14. Карлов А.М., Харин А.Г. Метод динамического управления компанией на основе показателя ее общей ценности // Экономический анализ: теория и практика. 2014. №22(373). С. 9-16.

References

1. Zadeh L.A. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility // Fuzzy Sets and Systems. №1. 1978. Pp. 3-28.
2. Buckley J. Solving fuzzy equations in economics and finance // Fuzzy Sets & Systems. №48. 1992. Pp. 298-296.
3. Buckley J. The Fuzzy Mathematics of Finance // Fuzzy Sets & Systems. №21. 1987. Pp. 257-273.
4. Hill A. Lafuente. Finansovy analiz v usloviyah neopredelennosti. Minsk, Tehnologiya, 1998. 150 s.
5. Zimmermann H. Fuzzy Sets Theory and Its Applications. KluwerAcademicPublishers. 2001. 315 p.
6. Volkogon V.A., Kuzin V.I. Celevoe programmirovaniye i investitsii v osnovnoy capital rybopromyshlennogo kompleksa. Baltiyskiy ekonomicheskiy zhurnal. 2016. №2(16). S. 47-54
7. Volkogon V.A., Sergeev L.I. Programmno-celevye vosproizvodstvennyye proporcii razvitiya rybohozyaystvennogo kompleksa strany. Rybnoye hozyaystvo. 2016. №3. S. 16-22
8. Korneva O.V., Mnatcakanyan A.G. Sovershenstvovaniye biznes-processov predpriyatiy rybnoy otrasli. Finansovaya analitika. 2014. №7(193). S. 26-31
9. Koryakina A.V., Mnatcakanyan A.G., Teplickiy V.A. Investitsionnyye resursy rybohozyaystvennogo kompleksa (na primere rybohozyaystvennogo kompleksa Kaliningradskoy oblsti). Kaliningrad. Izd-vo FGBOU VPKGTU. 2014. 98s.
10. Nedosekin A.O. Metodologicheskie osnovy modelirovaniya finansovoy deyatel'nosti s ispolzovaniem nechetko-mnozhesvennykh opisaniy. Sant-Peterburg. SpbGEiF. 2003. 280 s.
11. Teplickiy V.A. Mnatcakanyan A.G., Koryakina A.V. Osnovnyye puti razvitiya rybohozyaystvennogo kompleksa Rossii i Kaliningradskoy oblsti. Baltiyskiy ekonomicheskiy zhurnal. 2016. №1(13). S. 147-154
12. Halov E.A. Sistematischeskiy obzor chetkiy funktsii prinadlezhnosti intellektualnykh system. Informatsionnyye i vychislitelnyye sistemy. 2009. №3. S. 60-74
13. Zadeh L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh znacheniy. Moskva. Mir. 1976. 165 s.
14. Karlov A.M., Kharin A.G. Metod dinamicheskogo upravleniya kompaniy na osnove pokazatelya ee obshey cennosti. Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. 2014. №22(373). S. 9-16.

УДК 004.41 +330.3

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

Федор Георгиевич Майтаков

ведущий специалист технопарка

Калининградский государственный технический университет

236022, г. Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: maitakov@mail.ru

Александр Алексеевич Меркулов

начальник технопарка

Калининградский государственный технический университет

236022, г. Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: vsmcenose@mail.ru

Евгений Владимирович Петренко

ведущий специалист технопарка

Калининградский государственный технический университет

236022, г. Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: petrenkoe@mail.ru

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, начальник управления инновационной деятельности

Калининградский государственный технический университет

236022, г. Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: yafasov@list.ru

Аннотация

Для повышения эффективности управления государством создаётся система распределённых ситуационных центров (СРСЦ). В статье рассмотрены проблемы разработки и внедрения ситуационных центров (СЦ) как компонентов СРСЦ, и в частности проблема взаимодействия и обмена данными. **Целью работы** является разработка технологии создания СРСЦ, которая позволит решить проблему взаимодействия узлов, увеличит скорость проектирования конкретного СЦ. Рассмотрены различные варианты решения указанных проблем. Предложен подход к созданию СРСЦ как децентрализованной одноранговой отказоустойчивой сети, в которой узлами являются унифицированные ситуационные центры. Для проектирования таких СЦ предлагается использовать модель данных «категории сущностей и связей» и модель унифицированной виртуальной рабочей среды. Рассмотрена возможность использования технологии «блокчейн» для организации общего безопасного хранилища данных и алгоритмов достижения консенсуса для решения конфликтов между узлами сети.

Ключевые слова: ситуационный центр, система распределённых ситуационных центров, модель «категории сущностей и связей», модель унифицированной виртуальной рабочей среды, блокчейн, алгоритмы достижения консенсуса.

TECHNOLOGY OF DISTRIBUTED SITUATION CENTERS SYSTEM ENGINEERING

Fedor G. Maitakov

leading specialist of the Technopark

Kaliningrad State Technical University

Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

e-mail: maitakov@mail.ru

Aleksandr A. Merkulov

head of Technopark

Kaliningrad State Technical University

Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

e-mail: vsmcenose@mail.ru

Evgeniy V. Petrenko

leading specialist of the Technopark

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: petrenkoe@mail.ru

Abdurashid Ya. Yafasov
Dr.Sci.Tech., head of Innovation department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: yafasov@list.ru

Abstract

To improve the efficiency of state management, a system of distributed situational centers (SDSC) is being created. In the article authors examined the problems of development and introduction of situational centers (SC) as components of SDSC, and in particular they paid attention to the problem of interaction and data exchange. The main goal of the work is the development of SDSC creation technology, which is to solve the problem of interaction of nodes, increase the design speed of a particular SC. Various solutions to these problems are taken into consideration. Authors proposed an approach for the creation of SDSC as a decentralized peer-to-peer, fault-tolerant network, in which nodes are unified situational centers. For the design of such a SC, it is proposed to use the data model of the "categories of entities and relations" and the model of the unified virtual work environment. The possibility of using blockchain technology for organizing a common secure data warehouse and consensus building algorithms for resolving conflicts between network nodes is examined.

Keywords: situational center, system of distributed situational centers, model of "categories of entities and relations", model of unified virtual work environment, blockchain, consensus algorithms.

Введение

Ситуационные центры (СЦ) становятся неотъемлемой частью систем управления государственными и крупными бизнес структурами. СЦ активно используются для решения задач национальной обороны (национальный центр управления обороной), министерства чрезвычайных ситуаций (национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России), ФСБ России (СЦ ФСБ России), регионов (СЦ регионов), муниципальных образований и многих других. Проведена огромная работа в области правового регулирования вопросов разработки и внедрения СЦ [1–3]. Таким образом, на высшем государственном уровне принято решение о создании системы распределённых ситуационных центров (СРСЦ), обязанных с одной стороны обеспечить эффективное управление единицей административной структуры (ЕАС) (страна, регион, муниципалитет, министерство, отрасль экономики, правительство и т.д.), с другой стороны обеспечить оперативное поступление данных в СЦ вышестоящих, одноуровневых и подчинённых ЕАС, для осуществления эффективного управления государством в целом. Следует отметить, что обмен данными в общем случае не происходит по строго иерархическим направлениям (от подчинённого к вышестоящему ЕАС и наоборот), а осуществляется в соответствии с внешней средой ЕАС как организации [4], причём количество различных внешних СЦ, с которыми взаимодействует конкретный ЕАС, может со временем измениться. Классический СЦ должен обеспечить сбор, хранение, аналитическую обработку данных для осуществления мониторинга, моделирования, прогнозирования и

планирования ситуации в объекте управления. Сегодня значительное число работ посвящено проблемам создания интеллектуальных инструментов анализа, моделирования и прогнозирования, но для создания СРСЦ очень важно решение проблемы, связанной со сбором и хранением данных. В результате работы разных высококвалифицированных команд, которые занимались разработкой СЦ, было получено большое количество индивидуальных аппаратно-программных комплексов, эффективно решающих задачи конкретной ЕАС. Однако, индивидуальные архитектурные решения, в том числе и при проектировании хранилищ данных, делают критично трудоёмким или вовсе невозможным решение задач обмена данными с другими СЦ в СРСЦ. Могут быть предложены различные подходы для решения задачи обмена данными в СРСЦ:

1. Разработка структур и форматов передачи данных между различными СЦ. Данный подход подразумевает структуризацию и стандартизацию данных, которые будут курсировать между СЦ различных ЕАС. Этот подход предоставляет некоторую степень свободы разработчикам СЦ в решении задач проектирования модели предметной области хранилищ данных, но обязывает производить операцию конвертирования структуры хранения данных к структуре, определённой в стандарте обмена данными между СЦ, при экспорте данных и обратную операцию при импорте данных. Следует отметить, что данный подход порождает большое количество потенциальных проблем в последующей интеграции СЦ в СРСЦ.

2. Разработка единой архитектуры государственных данных (ЕАГД) [5]. Подход подразумевает разработку и внедрение единой

структуры хранения данных в каждом из конкретных СЦ. Решение данной сложной научно-практической задачи в перспективе способно значительно упростить обмен данными в СРСЦ. Также единая структура хранения данных даёт ряд возможностей в области разработки универсальных платформенных решений, позволяющих оперативно создавать СЦ конкретных ЕАС, которые сразу внедряются в СРСЦ.

Авторы придерживаются второго подхода и ставят целью данной работы предложить технологию создания СРСЦ, которая позволит решить проблему обмена данными и значительно упростить разработку СЦ для ЕАС.

1. Обзор работ по тематике СРСЦ

Системы поддержки принятия решений (СППР) прошли путь развития от классической теории управления [6] до интеллектуальных систем автоматического управления [7]. Новым витком эволюции СППР сегодня являются ситуационные центры. Основополагающими в области ситуационного управления являются работы Д.А. Поспелова [8]. Из зарубежных авторов необходимо отметить работу британского кибернетика С. Бира [9], посвящённую созданию ситуационного центра для управления плановой экономикой Чили. Значительный вклад в область обобщения и систематизации практического опыта создания СЦ в России сделал Н.И. Ильин [10].

Отличительной особенностью современных разработок в области создания СЦ является их рассмотрение как централизованных систем. С точки зрения технической реализации СЦ рассматривается как аппаратно-программный комплекс, который обеспечивает сведение всех информационных потоков в единую физическую точку и на основе обработки и анализа этих потоков помогает руководителю осуществлять эффективное управление. Наиболее часто встречающийся алгоритм внедрения СЦ в конкретном ЕАС состоит из следующих этапов: анализ требований, проектирование, установка и наладка оборудования, программирование, тестирование, системная интеграция, внедрение, сопровождение. Данный алгоритм эффективно работает при создании СЦ низкоуровневой ЕАС в целях её руководителя. Как правило, разработчики обеспечивают выполнение задач лица, принимающего решение (ЛПР), на его уровне управления, а затем приступают к этапу интеграции СЦ в СРСЦ. Именно в момент интеграции СЦ в СРСЦ возникают самые значительные проблемы, связанные с необходимостью извлечения данных из СЦ-отправителя и передачи их СЦ-получателю:

1. Отсутствие данных в СЦ-отправителе, которые необходимо передать СЦ-получателю. Проблема обычно связана с отсутствием системы сбора некоторых данных в СЦ-

отправителе вследствие отсутствия необходимости в них у ЛПР СЦ-отправителя.

2. Разные форматы приёма данных в СЦ-получателях. Например, СЦ-отправитель обеспечивает данными несколько СЦ-получателей, которым требуются одни и те же наборы данных, но представленные в разных структурах и форматах.

3. Несогласованность классификаций данных в СЦ-отправителе и СЦ-получателе. Проблема связана со свободой введения и использования в каждом из СЦ собственных классификаций, которые в общем случае не согласовываются с системами классификации других СЦ.

4. Отсутствие первичных данных в СЦ-отправителе, которые необходимы для СЦ-получателя. Проблема возможна при неправильной организации сбора и хранения данных в СЦ-отправителе: данные хранятся в агрегированном виде или отсутствует история изменения данных.

5. Временная неработоспособность СЦ-отправителя. В СЦ-отправителе, могут происходить технические сбои, форс-мажорные ситуации, которые приводят к перебоям в обеспечении данными СЦ-получателя.

Таким образом, получается абсурдная ситуация: разработчик добросовестно выполнил свою работу, затрачено огромное количество материальных и интеллектуальных ресурсов, создан СЦ, который частично или полностью (обычно в самых низкоуровневых ЕАС) решает задачи ЛПР, но СРСЦ в целом не работает: данные, поступающие в СЦ высокоуровневых ЕАС являются неполными и/или некорректными, что приводит к невозможности осуществления анализа, моделирования, прогнозирования и планирования ситуации на основе этих данных. В таких условиях неполноты и некорректности исходных данных каждому СЦ для осуществления эффективного управления необходимо содержать значительный штат специалистов (аналитики, операторы, инженеры, эксперты и т.д.), которые занимаются ручным сбором, введением в систему и обработкой данных. Такой вариант работы СЦ возможен в высокоуровневых ЕАС, где необходимость решения поставленных ЛПР задач (задачи национальной обороны, задачи экономики государства и т.д.) оправдывает затрату любых материальных средств. В низкоуровневых ЕАС, где ресурсы ЛПР более ограничены, содержание постоянного многочисленного штата специалистов СЦ является затруднительным. Для предотвращения подобной ситуации при проектировании необходимо рассматривать СЦ конкретной ЕАС в первую очередь как элемент СРСЦ, и лишь потом как инструмент решения задач ЛПР этой ЕАС. Основным объектом изучения и автоматизации становится именно СРСЦ, а СЦ – его компонентом. Отсюда необходимость выставления требований к СРСЦ, на основе которых будут формироваться требования к СЦ. С точки зрения авторов

современная СРСЦ должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Децентрализованность. Отсутствует центральный узел, который осуществляет управление всей системой.

2. Отказоустойчивость. Все данные конкретного узла реплицируются в другие узлы системы. Достигается сохранность данных в системе. Данные хранятся с некоторой степенью избыточности. Чем выше степень избыточности хранения данных, тем ниже вероятность их потери. В совокупности с условием децентрализованности система лишена единой точки отказа. При временной или постоянной неработоспособности конкретного СЦ, вследствие его уничтожения, возникновения природных катаклизмов или иных обстоятельств непреодолимой силы, все данные будут сохранены, а сотрудники СЦ смогут продолжить работу в любом другом технически оборудованном комплексе, который сможет обеспечить подключение специалистов к СРСЦ. Более того, с учётом роста аппаратных возможностей современных мобильных устройств и новых способов человеко-машинного взаимодействия [11], закономерно ожидать трансформацию СЦ из автономного стационарного комплекса, оборудованного мощной вычислительной техникой, экранами коллективного пользования, видеостенами, средствами коммуникации и т.д. в что-то принципиально новое.

3. Масштабируемость. Система является динамически расширяемой. Введение в состав СРСЦ нового элемента является максимально простой и понятной операцией и не должно приводить к трате значительных временных, материальных и интеллектуальных ресурсов. Основные ресурсы тратятся на аппаратное оборудование нового СЦ и проведение организационных мероприятий по внедрению.

4. Безопасность. Обеспечена безопасность и сохранность данных системы. Осуществлено разграничение доступа для различных категорий пользователей системы.

5. Сопровождаемость. Обеспечена понятная технология обновления программного обеспечения любого из элементов СРСЦ, которая предоставляет возможность оперативного исправления ошибок и расширения функциональных возможностей СРСЦ.

Предложенные требования заставляют рассматривать СРСЦ как децентрализованную одноранговую сеть без единой точки отказа. Сеть состоит из идентичных унифицированных узлов, которые работают в соответствии с общими правилами этой сети. Каждый узел с одной стороны обеспечивает безопасную работу сети (хранение данных других СЦ), с другой стороны выполняет функции конкретного СЦ. Причём функции, которые может выполнять каждый конкретный узел для своего ЛПР, могут быть сколь угодно сложными и интеллектуальными. Архитектурное единообразие позволяет

расширять функциональные возможности конкретного СЦ и распространять это обновление по сети. Значительно снижаются затраты на сопровождение и доработку системы, т.к. любые новые функциональные возможности внедряются сразу для всей сети, причём инициатором обновления может выступать любой из узлов.

Для создания СРСЦ, удовлетворяющей указанным требованиям и лишенной проблем обмена данными между узлами, должны быть предприняты следующие шаги:

1. Разработка единой архитектуры государственных данных (ЕАГД) [5]. Данный шаг был обозначен основоположником отечественной школы в области теории и практики ситуационных центров Н.И. Ильиным. Без выполнения этой колоссальной работы по классификации и систематизации данных невозможно обеспечить стабильное информационное взаимодействие между СЦ, а следовательно и эффективное функционирование СРСЦ не представляется возможным.

2. Разработка модели автоматизированного рабочего места (АРМ). Шаг позволит обеспечить оперативное создание автоматизированных рабочих мест для специалистов СЦ без значительных временных, материальных и интеллектуальных затрат на разработку.

3. Разработка протоколов взаимодействия и алгоритмов разрешения конфликтов между узлами в СРСЦ. Поскольку предложенная система является децентрализованной, то разрешение конфликтов между узлами попадает в область решения задачи достижения консенсуса.

Предложенные требования к СРСЦ предполагают решение сложных научно-практических задач в областях обработки больших объёмов данных, составлении онтологий, технологий распределённого реестра, криптозащиты, технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта. Однако решение этих задач позволит создать принципиально новый эффективный инструмент для решения задач ситуационного управления.

2. Технология создания СРСЦ на основе МКСС и МУВРС

В предыдущем разделе были сформулированы требования к СРСЦ как одноранговой децентрализованной сети без единой точки отказа и обозначены шаги, необходимые для реализации данной системы. **Решение задачи разработки ЕАГД с одной стороны** требует создания онтологии для формализации предметной области СРСЦ, с другой – выполнения трудоёмких работ по систематизации и классификации понятий различных предметных областей в соответствии с этой онтологией. Для формализации предметной области авторы предлагают использовать модель «категории сущностей и связей» (МКСС) [12], которая позволяет описывать гетерогенные предметные

области с помощью ограниченного набора категорий. В качестве инструмента для оперативного создания АРМ специалистов СЦ предлагается использовать модель унифицированной виртуальной рабочей среды (МУВРС) [13]. Задачи разработки протоколов взаимодействия и алгоритмов разрешения конфликтов между узлами находится в области технологий распределённого реестра.

Прорывом в области разработки распределённых реестров является технология «блокчейн» (от англ. Blockchain – цепь блоков). Технология была разработана человеком или группой людей под псевдонимом Сатоши Накамото для организации децентрализованной платёжной системы Биткоин (англ. Bitcoin) и позволяет организовать распределённое хранение данных в сети без возможности их злонамеренной правки и удаления.

На рис. 1 представлена концептуальная структура блокчейн. Блокчейн является последовательной цепочкой блоков. Каждый i -ый блок b_i в общем случае содержит два элемента: набор данных d_i и некоторую хеш-сумму блока h_i . Хеш-сумма блока рассчитывается по формуле (1).

$$h_i = f_{hash}(d_i + h_{i-1}), \quad (1)$$

где f_{hash} – некоторая криптографическая функция.

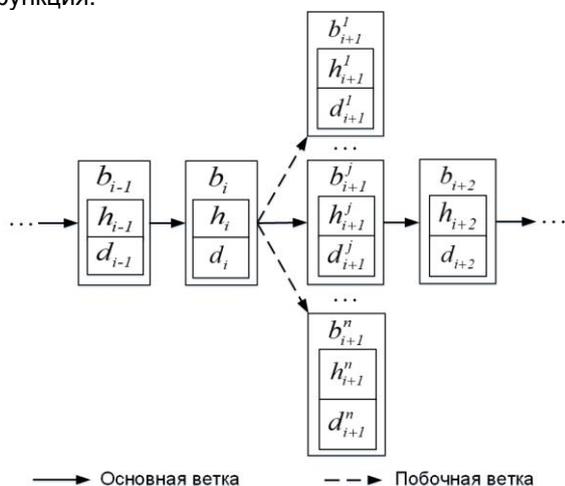


Рис. 1. Концептуальная структура блокчейн

Хеш-сумма каждого блока формируется путём хеширования криптографической функцией данных d_i текущего блока и хеш-суммы предыдущего блока. Каждый узел сети может хранить у себя полную копию данной структуры или только идентификационные данные каждого блока – его хеш-сумму, и при необходимости загружать полную версию блока из других узлов сети. Данные хранящиеся в такой структуре являются неизменяемыми. Любое изменение данных в блоке приведёт к изменению его хеш-

суммы. Подделка любого из блоков злоумышленником будет легко обнаружена путём сравнения хеш-суммы подделанного блока с хеш-суммой следующего за ним. При обнаружении подделанного узла, цепочка блоков, следующая за ним, становится не действительной и не будет верифицирована ни одним из других узлов сети. Каждый из узлов может сформировать свой локальный блок и предложить его сети для включения в блокчейн.

Для создания и поддержания структуры блокчейн в децентрализованной сети с недоверенными узлами должна быть решена задача достижения консенсуса в сети и реализован алгоритм разрешения конфликтов. [14, 15]. В частности, сеть должна достигнуть консенсуса в вопросе о том какой из узлов будет следующим публиковать свой блок в блокчейн. Современные децентрализованные системы обычно используют алгоритмы основанные на доказательстве работы POW (англ. Proof Of Work) [16, 17] и доказательстве доли POS (англ. Proof Of Stake) [18]. Каждый из алгоритмов имеет как свои преимущества, так и недостатки: POW – большая трата энергоресурсов в процессе работы алгоритма, POS – вероятность концентрации управления в определённых узлах сети. Эти алгоритмы позволяют выбрать узел, который следующим добавит блок в блокчейн случайным и при этом легко верифицируемым способом. Например, при использовании алгоритма POW, узлы сети соревнуются между собой в решении некоторой задачи (2).

$$h_x = f_{hash}(h_i + x), \quad (2)$$

где h_i – хеш-сумма локального блока (способ её получения рассмотрен выше), который пытается добавить в блокчейн узел b_i , x – некоторое значение.

Суть соревнования заключается в том, что узел должен подобрать такое значение x , чтобы значение h_x было меньше некоторого значения (например, хеш-сумма h_x должна иметь n ведущих нулей). Решить данную задачу узел может только путём перебора значений x , что гарантирует случайный выбор победителя.

Следует отметить, что при достижении определённого количества узлов в сети возможно ветвление на конце блокчейн. Такое возможно из-за того, что несколько узлов одновременно находят необходимое для публикации своего блока значение x , но в силу большого количества узлов уходит какое-то время на оповещение сети о победе в соревновании. Ситуация проиллюстрирована на рис. 1, где $i + 1$ -ый блок представлен различными блоками $[b_{i+1}^1 \dots b_{i+1}^n]$ в разных узлах сети. Получается коллизия при которой в сети на конце блокчейн одновременно существуют различные ветки блоков. Однако, в процессе дальнейшего

построения блокчейн, какая-то из веток становится длиннее остальных. Самая длинная ветка считается основной и каждый узел, находя основную ветку, начинает работать с ней. Блоки, которые находятся в побочных ветках, становятся не действительными и узлы пытаются повторно включить их уже в основную ветку блокчейн.

Предложение авторов заключается в использовании решений технологии блокчейн для организации СРСЦ, что позволит превратить СРСЦ в децентрализованную сеть без единой точки отказа. Многократно снижается риск утраты данных или их компрометирования. Разработка ЕАГД на основе МКСС позволит унифицировать структуры хранения и алгоритмы обработки данных для всех СЦ в сети. Использование МУВРС позволит динамически конструировать уникальные АРМ из наборов готовых инструментов и быстро расширять функциональные возможности каждого отдельного СЦ, а следовательно и всей сети в целом.

3. Реализация СРСЦ

Технологию блокчейн предлагается использовать для реплицирования данных СЦ в СРСЦ. Предлагается создать блокчейн, в котором каждый СЦ будет публиковать данные за определённый период времени. Таким образом, все данные, которые содержатся в конкретном СЦ, будут дублированы в зашифрованном виде в разных узлах сети. Шифрование данных осуществляется с помощью алгоритмов ассиметричного шифрования, т.е. в каждом СЦ есть секретный ключ, который находится у руководителя, и публичный, который публикуется в блокчейн и доступен всем участникам сети. При публикации в блокчейн данные шифруются публичным ключом СЦ. В случае неработоспособности какого-то СЦ, его сотрудники могут быть передислоцированы в другой технически оснащённый комплекс, который может обеспечить функционирование временного СЦ. Блокчейн выгружается в хранилище данных нового комплекса и данные, которые были ранее опубликованы, расшифровываются с помощью секретного ключа СЦ.

В отличие от таких децентрализованных сетей как Биткоин, в СРСЦ не предполагается свободного включения новых узлов в сеть. Такое решение должно приниматься большинством узлов. Т.е. ввод в эксплуатацию нового СЦ сопровождается отправкой запроса на включение узла СРСЦ, а сеть в свою очередь достигает какого-то консенсуса и принимает положительное или отрицательное решение. Аналогичным образом принимается решение об исключении какого-либо узла из сети. Исключается возможность захвата управления сетью. Для захвата управления сетью злоумышленникам необходимо захватить сразу более 50% всех узлов сети, что является очень сложной задачей.

В противном случае сеть просто последовательно исключит скомпрометированные узлы. Предусмотрена возможность централизации некоторых функций у определённых сотрудников: в блокчейн могут размещаться правила, дающие возможность определённым лицам (владельцам секретных ключей) управлять сетью, минуя механизм достижения консенсуса. Например, в некоторых чрезвычайных ситуациях ЛПР в СРСЦ должен иметь возможность единоличного принятия решения, даже если это решение расходится с консенсусом всей сети. В этом случае любой из узлов может инициировать какую-то операцию, обязательную для выполнения всей сетью, и верифицировать её секретным ключом. Предложенная логика превращает любой технически оснащённый комплекс СЦ в заменяемый интерфейс для управления ЕАС и взаимодействия с другими участниками СРСЦ.

Для создания СРСЦ, в соответствии с предложенной технологией необходимо спроектировать архитектуру унифицированного СЦ как узла сети. Архитектура, предложенная авторами, изображена на рис. 2.

Программный комплекс состоит из ядра и независимо компилируемых и динамически подключаемых к нему модулей – плагинов. Каждый i -ый плагин добавляет в СЦ определённый функционал и имеет структуру (3).

$$PL_i = \{DL_PL_i, LL_PL_i, IL_PL_i\}, \quad (3)$$

где DL_PL_i – компонент слоя данных, LL_PL_i – компонент слоя логики, IL_PL_i – компонент слоя пользовательского интерфейса (виджет). DL_K – компонент ядра в слое данных. Этот компонент реализует универсальную модель данных «Категории сущностей и связей», на базе которой строится аппарат описания модели предметной области. Если необходимые функциональные возможности по хранению, обработке и отбору данных плагина не могут быть обеспечены компонентом ядра в слое данных DL_K , то плагин может расширить МКСС путём реализации собственного компонента слоя данных DL_PL_i . Менеджер плагинов управляет динамическим подключением и отключением плагинов. Конструктор пользовательского интерфейса позволяет осуществлять гибкую настройку АРМ специалиста СЦ путём компоновки нескольких плагинов в одной конфигурации и настройки их взаимодействия через менеджер событий. За работу программного комплекса как узла в сети СРСЦ отвечает менеджер сетевого взаимодействия. Этот компонент отвечает за выгрузку из сети актуальной версии блокчейн, извлечение и расшифровку данных из него в оперативную базу данных СЦ, верификацию блоков, формирование локального блока с

данными, публикацию локального блока в блокчейн сети, защиту СЦ в сетевом пространстве, а также за коммуникацию СЦ через отдельные плагины с другими участниками сети $[SC_1 \dots SC_N]$.

Предложенная архитектура позволяет построить децентрализованную безопасную сеть ситуационных центров для управления различными ЕАС.

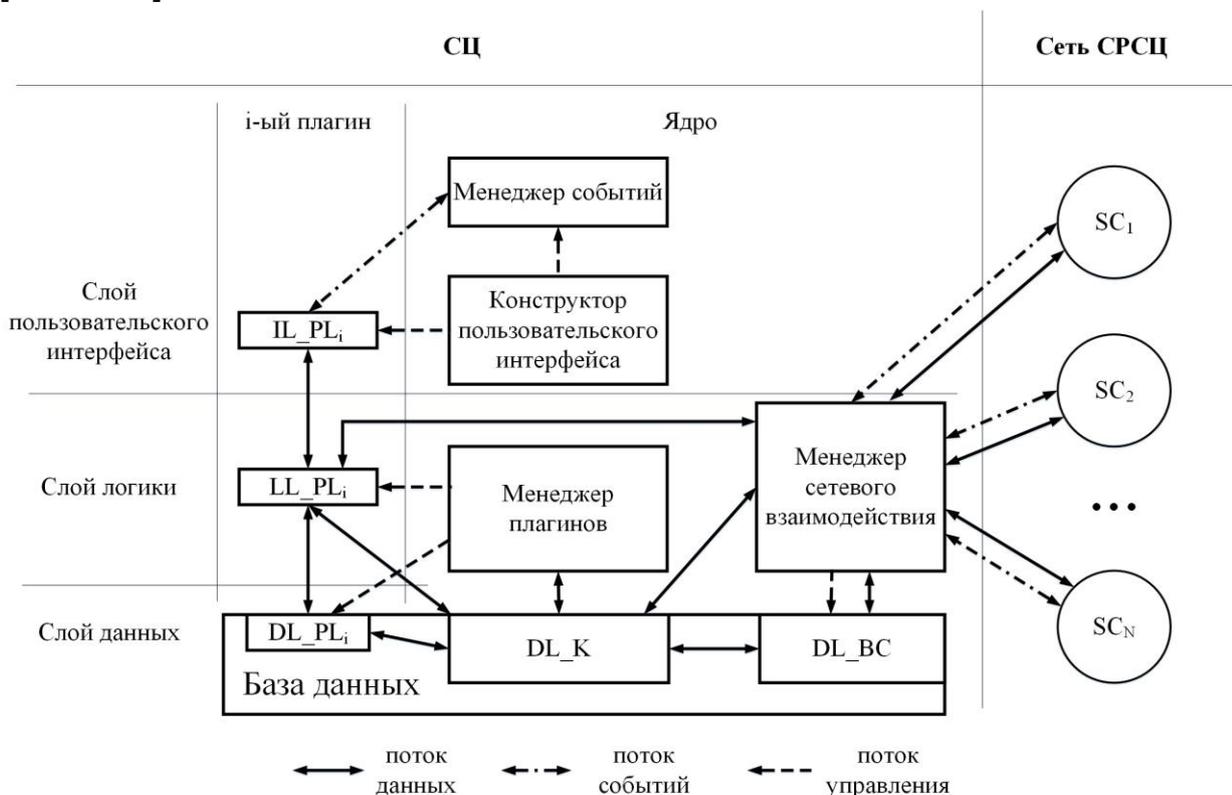


Рис. 2. Архитектура унифицированного узла СРСЦ

Заключение

Разработана и предложена технология создания СРСЦ как одноранговой децентрализованной сети. Предложена МКСС для унифицированного хранения и обработки данных различных предметных областей. Предложена

МУВРС для оперативного создания АРМ специалистов СЦ. Предложено использование технологии блокчейн совместно с алгоритмами достижения консенсуса для распределённого безопасного хранения данных и разрешения конфликтов в сети.

Литература

1. Указ Президента РФ № 537 от 12.05.2009 г. «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года»
2. Концепция создания системы распределенных ситуационных центров органов государственной власти Российской Федерации от 3 октября 2013 г. № Пр-2308
3. Указ Президента РФ от 25.07.2013 г. № 648 «О формировании системы распределенных ситуационных центров, работающих по единому регламенту взаимодействия»
4. Меркулов А. А. Ситуационный центр VSM Cenose – Калининград: Изд-во ООО «Техноценоз», 2014 – 312 с.
5. Ильин Н. И. Ситуационные центры как ядро цифровой экономики // Доклад на Всероссийском форуме «СРСЦ–2017» – Санкт-Петербург, 25-27 октября 2017 г.
6. Растринин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами – М.: Сов. радио, 1980 – 232 с.
7. Макаров И. М., Лохин В. М. Интеллектуальные системы автоматического управления – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001 – 576 с.
8. Поспелов Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика – М.: Наука, 1986 – 228 с.
9. Бир С. Мозг фирмы – М.: Радио и связь, 1993 – 416 с. – ISBN 5-256-00426-3.
10. Ильин Н. И., Демидов Н. Н., Новикова Е. В. Ситуационные центры. Опыт, состояние, тенденции развития – М.: МедиаПресс, 2011 – 336 с. – ISBN 978-5-902750-18-5.

11. Mann S., Fung J.. Videorbits on EyeTap devices for deliberately diminished reality or altering the visual perception of rigid planar patches of a real world scene // Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Mixed Reality, pp 48-55, March 14–15, 2001
12. Дмитриевский В. А., Майтаков Ф. Г., Меркулов А. А. Модель данных «Категории сущностей и связей» – Калининград: БФУ им. Канта, 2014 – 86 с. – ISBN 978-5-9971-0293-7.
13. Майтаков Ф. Г., Меркулов А. А., Петренко Е. В., Яфасов А. Я. Технология синтеза виртуальной рабочей среды для гетерогенных территориально распределенных коллективов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 4 - Выпуск 62. (в печати)
14. Malkhi D., Lamport L., Zhou L. Stoppable Paxos [Электронный ресурс]: Microsoft TechReport MSR-TR-2008-192. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2008/04/stoppableV9.pdf> (дата обращения: 27.11.2017)
15. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm [Электронный ресурс]: Stanford University. URL: <https://ramcloud.stanford.edu/wiki/download/attachments/11370504/raft.pdf> (дата обращения: 27.11.2017)
16. Dwork C., Naor M. Pricing via Processing or Combatting Junk Mail [Электронный ресурс]: IBM Research Division, Almaden Research Center. URL: <http://www.hashcash.org/papers/pvp.pdf> (дата обращения: 27.11.2017)
17. Jakobsson M., Juels A. Proofs of work and bread pudding protocols [Электронный ресурс]: Information Sciences Research Center, Bell Labs; RSA Laboratories. URL: <http://www.arjuel.com/wp-content/uploads/2013/09/PoW.pdf> (дата обращения: 27.11.2017)
18. Bentov I., Gabizon A., Mizrahi A. Cryptocurrencies without Proof of Work. [Электронный ресурс]: arXiv Cryptography and Security. URL: <https://decred.org/research/bentov2015.pdf> (дата обращения: 27.11.2017)

References

1. Ukaz Prezidenta RF № 537 ot 12.05.2009 g. «O Strategii natsional'noy bezopasnosti Ros-siyskoy Federatsii do 2020 goda»
2. Kontseptsiya sozdaniya sistemy raspredelennykh situatsionnykh tseftrov organov gosudarstvennoy vlasti Rossiyskoy Federatsii ot 3 oktyabrya 2013 g. № Pr-2308
3. Ukaz Prezidenta RF ot 25.07.2013 g. № 648 «O formirovaniy sistemy raspredelennykh si-tuatsionnykh tseftrov, rabotayushchikh po edinomu reglamentu vzaimodeystviya»
4. Merkulov A. A. Situatsionnyy tsentr VSM Cenose. Kaliningrad: Izd-vo OOO «Tekhnosnoz», 2014. 312 pp.
5. Il'in N. I. Situatsionnye tseftry kak yadro tsifrovoy ekonomiki. Doklad na Vserossiyskom forume «SRSTs-2017». Sankt-Peterburg, 25-27 oktyabrya 2017 g.
6. Rastrigin L. A. Sovremennyye printsipy upravleniya slozhnyimi ob'ektami. M.: Sov. radio, 1980. 232 pp.
7. Makarov I. M., Lokhin V. M. Intel'ktual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. M.: FIZMATLIT, 2001. 576 pp.
8. Pospelov D. A. Situatsionnoe upravlenie. Teoriya i praktika. M.: Nauka, 1986. 228 pp.
9. Bir S. Mozg firmy. M.: Radio i svyaz', 1993. 416 pp. ISBN 5-256-00426-3
10. Il'in N. I., Demidov N. N., Novikova E. V. Situatsionnye tseftry. Opyt, sostoyanie, tendentsii razvitiya. M.: MediaPress, 2011. 336 pp. ISBN 978-5-902750-18-5
11. Mann S., Fung J.. Videorbits on EyeTap devices for deliberately diminished reality or altering the visual perception of rigid planar patches of a real world scene // Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Mixed Reality, pp 48-55, March 14–15, 2001
12. Dmitrovskiy V. A., Maytakov F. G., Merkulov A. A. Model' dannykh «Kategorii sushchnostey i svyazey». Kaliningrad: BFU im. Kanta, 2014. 86 pp. ISBN 978-5-9971-0293-7
13. Maytakov F. G., Merkulov A. A., Petrenko E. V., Yafasov A. Ya. Tekhnologiya sinteza virtual'noy rabochey sredy dlya geterogennykh territorial'no raspredelennykh kollektivov. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2017. № 4. Vypusk 62. (v pechati)
14. Malkhi D., Lamport L., Zhou L. Stoppable Paxos [Elektronnyy resurs]: Microsoft TechReport MSR-TR-2008-192. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2008/04/stoppableV9.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2017)
15. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm [Elektronnyy resurs]: Stanford University. URL: <https://ramcloud.stanford.edu/wiki/download/attachments/11370504/raft.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2017)
16. Dwork C., Naor M. Pricing via Processing or Combatting Junk Mail [Elektronnyy resurs]: IBM Research Division, Almaden Research Center. URL: <http://www.hashcash.org/papers/pvp.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2017)
17. Jakobsson M., Juels A. Proofs of work and bread pudding protocols [Elektronnyy resurs]: Information Sciences Research Center, Bell Labs; RSA Laboratories. URL: <http://www.arjuel.com/wp-content/uploads/2013/09/PoW.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2017)
18. Bentov I., Gabizon A., Mizrahi A. Cryptocurrencies without Proof of Work. [Elektronnyy resurs]: arXiv Cryptography and Security. URL: <https://decred.org/research/bentov2015.pdf> (data obrashcheniya: 27.11.2017)

УДК 332.1

ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЯНТАРНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, начальник управления инновационной деятельности
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: yafasov@list.ru

Александр Алексеевич Меркулов

начальник технопарка
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: vsmcenose@mail.ru

Анастасия Сергеевна Липская

аспирант
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: anastasiya.lipskaya@klgtu.ru

Аннотация

Проведен анализ материальных потерь в янтарной отрасли и выполнена оценка упущенной выгоды, связанной с технологической отсталостью отрасли и несовершенством системы управления. **Цель работы:** формирование подходов к модернизации отрасли, к разработке концепции сетевого взаимодействия участников янтарного кластера с использованием распределенной интеллектуальной системы управления «Ситуационный центр». Рассмотрены вопросы глубокой переработки янтаря и янтарь содержащих пород, «голубой глины», модернизация янтарной отрасли России в контексте циклической экономики с применением информационных технологий. Рассмотрены распределенная диверсифицированная кластерная модель развития янтарной отрасли, перспективы развития субкластеров «Голубая глина» и «Биотехнологии». Показано, что внедрение региональной интеллектуальной системы «Ситуационный центр Янтарь» существенно повышает устойчивость развития янтарной отрасли с переходом на более высокий технологический и ценовой уровень выпускаемой продукции. В процесс переработки вовлекается весь спектр фракций янтаря и его субстанций, появляется возможность развития новых продуктовых линий на основе янтарь содержащих пород – глауконита, монтмориллонита и др.

Ключевые слова: циклическая экономика, модернизации янтарной отрасли, морская добыча янтаря, ситуационный центр, распределенная система управления, кластерная модель.

PROBLEMS AND WAYS OF AMBER INDUSTRY MODERNIZATION OF RUSSIA

Abdurashid Y. Yafasov

Abdurashid Ya. Yafasov
Dr.Sci.Tech., head of Innovation department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: yafasov@list.ru

Aleksandr A. Merkulov

head of Technopark
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vsmcenose@mail.ru

Anastasiya S. Lipskaya

PhD student of the department of economics
Kaliningrad State Technical University,
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: anastasiya.lipskaya@klgtu.ru

Abstract

The analysis of material losses in the amber industry was carried out and the loss of profits related to the technological backwardness of the industry and imperfection of the management system was assessed. The purpose of the work: the formation of approaches to the modernization of the industry, to the development of the concept of network interaction of the amber cluster participants using the distributed intellectual control system "Situation Center". The issues of deep processing of amber and amber containing rocks, "blue clay", modernization of the amber industry in Russia in the context of the cyclical economy with the use of information technologies are considered. The distributed diversified cluster model of the development of the amber industry, prospects for the development of subclusters "Blue Clay" and "Biotechnology" are considered. It is shown that the introduction of the regional intellectual system "Situation Center Yantar" significantly increases the stability of the development of the amber industry with the transition to a higher technological and price level of the products. The whole spectrum of fractions of amber and its substances is involved in the processing process, it is possible to develop new product lines based on amber containing rocks - glauconite, montmorillonite, etc.

Keywords: cyclical economy, modernization of the amber industry, amber marine mining, situational center, distributed control system, cluster model.

Введение

По мнению геммологов, янтарь является самым важным драгоценным камнем среди камней биологического происхождения (кораллы, слоновая кость, жемчуг, панцири черепах и др.). Необработанные кусочки янтаря находили в доисторических обитавших человеком пещерах: в Пиренеях возрастом ок.15000 лет до н.э., бусы из обработанного янтаря, датированные 11000-9000 до н.э., - в Англии, янтарные изделия возрастом 7000 лет до н.э. – в Дании [1]. На рис.1 представлена картина месторождений янтаря в Западной Европе [2], из которых наибольшие разведанные запасы располагаются в приморских регионах Южной Балтики - от побережья Латвии и до Германии, причем залежи простираются достаточно далеко в морские территории, чем объясняются периодические выбросы янтаря на берег во время штормов.

До сих пор у ученых нет ясного представления о происхождении янтаря. Взгляды многих исследователей этого камня [1-5] можно обобщить в виде следующей гипотезы: янтарь является продуктом полимеризации растительных смол в условиях длительного воздействия тепла и давления в анаэробной среде, причем в большинстве случаев этот процесс связывается с территориями, когда-либо занятыми морем. То есть, влияние морской среды играло определенную роль в формировании свойств янтаря. В энциклопедии по драгоценным камням [1] представлена наиболее часто встречающаяся гипотеза образования балтийского янтаря из смолы лесов, охватывавших большую часть нынешней Норвегии, Швеции, Финляндии и Восточной России: древние реки депонировали протоянтарь в своих дельтах, где смола начала свой длинный путь в десятки миллионов лет превращения в копал, затем в янтарь. Отсюда ледники переместили его к южному побережью Балтийского моря, поэтому самые крупные месторождения

природного янтаря на Балтийском побережье Польши и Калининградской области России.

Различают ископаемые и полуископаемые смолы, свойства которых определяются, прежде всего, условиями и временем их залегания, формирующим определенные потребительские свойства. Наибольшей потребительской ценностью обладает янтарь-сукцинит, относящийся к ископаемой смоле, наиболее известный и характерный из видов ископаемых смол, именуемых янтарями [3-5]. Он характеризуется возрастом не менее 110-120 млн лет и составляет примерно 98 % всего балтийского янтаря.



Рис.1 Картина залежей янтаря в Западной Европе

В последние два десятилетия активно разрабатываются месторождения янтаря на Северо-Западе Украины: в Полесье, где нелегальная добыча янтаря по экспертным оценкам достигает 150-200 тонн в год [6], а потери страны в стоимостном выражении до \$200-300 млн [7]. Но данные геологов по установленным запасам янтаря в Украине отсутствуют. Поэтому считается, что основные установленные, оконтуренные и оцененные крупные мировые запасы янтаря находятся в Польше и в Калининградской области России [8]. Запасы янтаря в Польше

оцениваются в 700 тысяч тонн, но они глубокого залегания и поэтому их добыча может стать рентабельной при условии существенного роста цен на янтарь. Утвержденные запасы Приморского месторождения в Калининградской области по категории А2, В и С1 составляют 118 тыс. т, по категории С2 – 52 тыс. т [9].

Состояние янтарной отрасли

Янтарная отрасль России, в основном, размещена в Калининградской области, за исключением ювелирных производств и художественных произведений в ряде городов России, использующих янтарь в качестве вставок в своих изделиях. Янтарная отрасль Калининградской области является ярко выраженной автономной замкнутой экономической системой с ограниченной открытостью в общей экономике региона. В последнее десятилетие, с 2007 по 2016 г., среднегодовая добыча янтаря Калининградским янтарным комбинатом составила 325±30 тонн, причем с 2014 года наблюдается непрерывный рост добычи [8]. По данным руководства комбината план по добыче янтаря на 2017 год в объеме 450 тонн, будет выполнен уже к концу ноября [10], а выручка комбината, с учетом реализации прежних запасов должна вырасти с 1,2 млрд. рублей в 2016 году до 3 млрд. рублей в 2017 г. Но при этом доля перерабатываемого на дочернем предприятии янтаря составляет менее 5%, падая с каждым годом. То есть, продолжается тренд экстенсивного развития янтарной отрасли региона, отмеченный в предыдущей работе [9].

Ожидаемая годовая максимальная выручка Янтарного комбината в 2017 году примерно в 4 раза ниже величины экспертных оценок объема годовых продаж украинского янтаря на теневого рынке [7, 11] и в 26 ниже годового оборота янтарных изделий на мировом рынке [12], который обеспечивается на 67% янтарем с Калининградского янтарного комбината. По данным, приведенным в Стратегии развития янтарной отрасли [8], фактическая добыча янтаря крупных и средних фракций (+23 мм, +32мм, и +100гр) Калининградского янтарного комбината за 7 лет, в 2009-2015 гг. составили на 21,2% меньше по сравнению с оценкой по геологии, а мелких фракций (-4 +16) – на 19,9% больше. Отсюда можно сделать вывод о том, что, по крайней мере, пятая часть добываемого янтаря крупных фракций в процессе добычи крошится и переходит в разряд мелких фракций, а 1,3% теряется безвозвратно, причем наблюдается тенденция к нарастанию потерь, рис.2.

Следует отметить, что к безвозвратным потерям относятся также упущенная возможность комбината, связанная с переработкой

не только января, но и январь

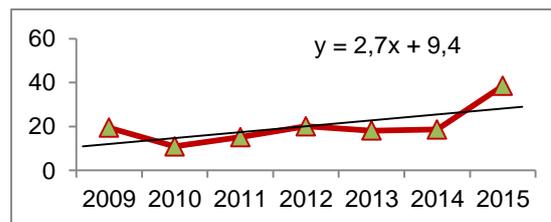


Рис.2. Переход янтаря фракции +23 мм, +32 мм и +100 во фракцию -4 +16 мм в процессе добычи и складирования, %

Содержащих пород, среды обитания янтаря – «голубой глины», богатой глауконитом, монтмориллонитом и др. полезными минералами и субстанциями янтаря. Они до последних лет выбрасывались в море, при этом платились огромные штрафы за загрязнение морской среды, а теперь отходы складываются в карьере. Системные исследования по загрязнению морской среды отвалами янтарного комбината глубоко не проводились. В этой связи целесообразна организация такого рода исследований влияния сбросов на биоту, а также пространственного планирования в парадигме Морская акватория – Приморская территория, так как методология морского пространственного планирования, предложенная, в частности в работе [14], не отражает всей полноты взаимосвязи процессов в акватории моря с процессами на приморских территориях.

Принимая в качестве гипотезы переход примерно пятой - седьмой части янтаря каждого типоразмера (каждой фракции) в нижележащий типоразмер за счет несовершенной технологии добычи и расфасовки янтаря можно оценить финансовые потери комбината на продажах с учетом биржевых цен, рис.3.

Приведенные цифры потерь показывают значительный научно-инновационный потенциал янтарной отрасли, реализация которого может в десятки раз увеличить объемы товарного производства на основе янтаря, если учесть возможность вовлечения в переработку субстанций янтаря и сопутствующих минералов в высокотехнологичных производствах и высокохудожественных изделиях [13]. Уникальные свойства янтаря позволяют ранжировано и разумно использовать весь диапазон добываемого материала по размерному составу: от уникальных штучных изделий из крупных камней до ювелирных изделий из янтаря средних фракций и широкого спектра художественных картин, косметических и специальных средств из янтаря мелких фракций, кормовых добавок в агропромышленном секторе экономики из сопутствующих материалов добычи янтаря. Последние два направления, развитые во времена Советского Союза, полностью

исчезли в постсоветский период, начали медленно восстанавливаться микропредприятиями и индивидуальными предпринимателями в полукустарных условиях. Его полное восстановление и развитие на новом технологическом уровне способно дать мощный импульс инновационному развитию янтарной отрасли. В этом плане важным условием успешной модернизации янтарной отрасли является развитие новых производств и технологий в контексте экономики замкнутого цикла, рециклинга [14] с применением современных инструментов управления в цифровой экономике в виде Ситуационных центров.

Ситуационный центр «Янтарь»

Решением проблем технологической модернизации янтарной отрасли и организации современной системы управления в контексте цифровой экономики является реализация кластерного подхода к организации отрасли с четким юридическим разделением предприятий по добыче янтаря, его переработке и реализации с исключением монопольного права, и структур в каждом из звеньев формирования добавочной стоимости. Универсальным инструментом технологической модернизации и эффективной работы любой отрасли в условиях цифровой экономики являются специализированные Ситуационные центры. Учитывая отсутствие на сегодняшний день на Калининградском янтарном комбинате системного подхода к организации работ по комплексной переработке янтаря, его различных фракций и субстанций, не вовлеченность в хозяйственный оборот ценнейшего побочного продукта янтарного производства – «голубой глины», отсутствие принятой в мировой практике комплекса инструментов по управлению взаимоотношениями с потребителями - «CRM-системы», разрозненность и разнонаправленность интересов участников янтарного кластера, напрашивается естественное управленческое решение сложившихся организационно-производственных и сбытовых проблем комбината и всей янтарной отрасли – создание Ситуационного центра «Янтарь» в концепции сетевого взаимодействия участников янтарного кластера с использованием распределенной интеллектуальной системы управления, включающей всех основных акторов янтарной отрасли.

Для его создания необходимо понимание постановки с последующим решением нижеперечисленных задач:

- разработка новых технологий добычи, транспортировки и сортировки янтаря, обеспечивающих минимальное разрушение

добываемого янтаря, создание систем автоматизации технологических процессов;

- создание новых технологий обработки янтаря, высокопроизводительного автоматизированного оборудования для предприятий по переработке янтаря, ювелирной промышленности;

- полная перестройка организации производства на предприятиях отрасли в контексте цифровой экономики и применения информационных технологий, в частности, в концепции «Умное производство», «Умный холдинг», «Умный кластер»;

- исследование возможностей использования субстанций янтаря (янтарное масло, янтарная кислота и др.) в различных отраслях промышленности и разработка технологий производства новой продукции на их основе;

- исследование «голубой глины» - геологической среды янтаря, в частности, глауконита для повышения эффективности производства аквакультуры и животноводства, плодородия земель, -развития производства экологически чистых продуктов питания;

- уточнение и решение экологических проблем

- дальнейшие исследования физико-химических и механических свойств янтаря с использованием новых методов и современной аппаратуры;

- разработка новых методов идентификации и сертификации янтаря;

- исследование новых методов модификации и улучшения потребительских свойств янтаря с помощью физических полей и физико-химическими способами;

- разработка новых продуктовых линий с использованием янтаря, янтарь содержащих веществ и сопутствующих месторождениям янтаря минералов;

- разработка комплекса инструментов по управлению взаимоотношениями с потребителями, поставщиками, инженерным и научно-технологическим сообществом.

С учетом необходимости глубокой модернизации в ближайшей перспективе, янтарный кластер Российской Федерации представляется в виде множества компаний разных отраслей, форм собственности и видов деятельности, современных университетов, исследовательских, экспертных и консалтинговых центров, интегрированных в единую креативную сеть интеллектуального, инженерного, материального и цифрового взаимодействия, обеспечивающую всем участникам возможность добиваться своих целей в глобальной конкуренции, рис.4. Главным институтом в этой сети должны стать инженерные университеты 3.0 – генераторы

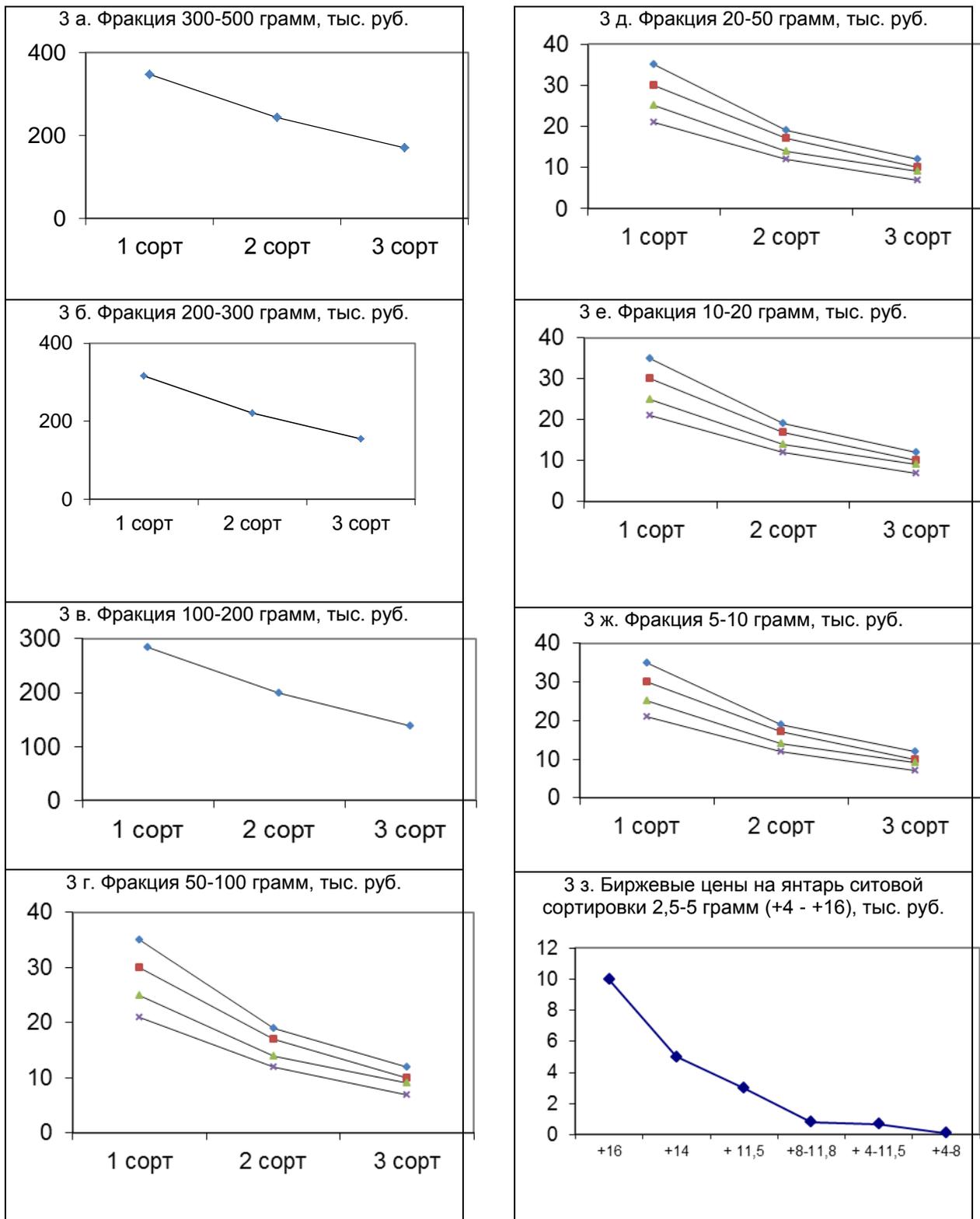


Рис. 3. Цены на янтарь в зависимости от фракции, сорта и типа

- - янтарь круглый матовый;
- - янтарь круглый прозрачный
- ▲— - янтарь плоский матовый;
- ×— - янтарь плоский прозрачный

Технологические потери комбината в 2017 г. в процессе добычи и складирования янтаря вследствие изменения фракционного состава оцениваются примерно в 650 млн. руб.

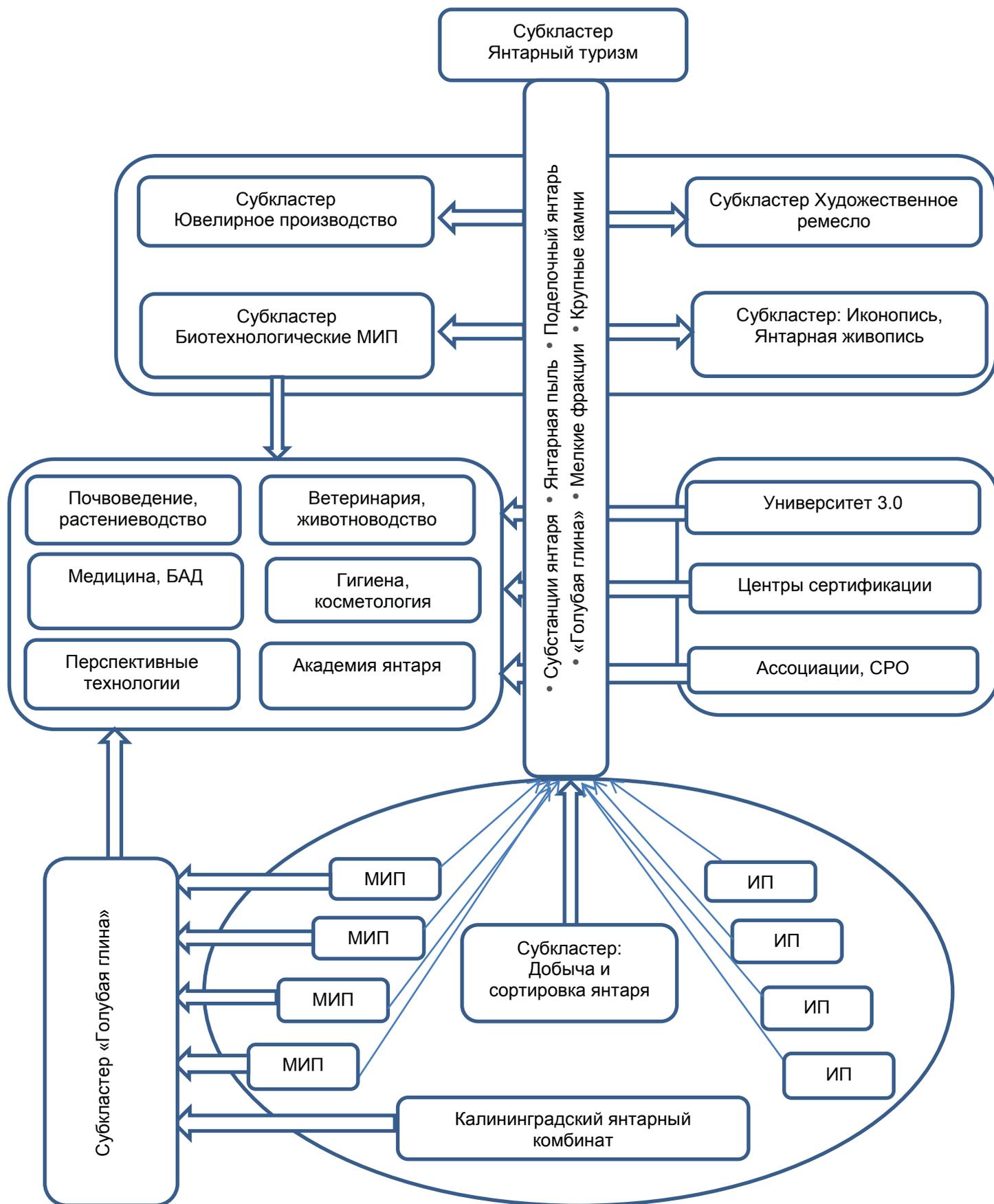


Рис. 4. Укрупненная кластерная модель янтарной отрасли

знаний, ядра креативного сообщества в области инженерной науки, технологий и производства.

На рис.4 представлена укрупненная кластерная модель инновационного развития янтарной отрасли с учетом ранее сформулированных направлений [9], Особенность рассмотренного Ситуационного центра заключается в том, что он позволяет учитывать не только сложившиеся процессы и действия акторов кластера, но и непрерывно вводить изменения, связанные как с модернизацией производства, так и внешней среды предприятий, в том числе беря на себя все функции «CRM-системы» – комплекса инструментов по управлению взаимоотношениями с потребителями.

При добыче янтаря до последнего времени отработанная порода сбрасывалась в море, внося определенный дисбаланс в прибрежную морскую акваторию, комбинат платил крупные штрафы за загрязнение морской среды, но парадокс заключается в том, что в море с пустой породой сбрасывались ценнейшие продукты – глауконит, монтмориллонит и др. минералы. Проведенный авторами анализ показал широкие возможности применения этих минералов в сельском хозяйстве [15,16]. Поэтому рециклинг, экономика замкнутого цикла является естественной парадигмой модернизации янтарной отрасли, а, следовательно, Ситуационного центра «Янтарь»



Рис. 5. Схема генетического проектирования

Остановимся более подробно на экономике замкнутого цикла – циклической экономике [14, 17]. Следует отметить ключевые периоды «Экономики замкнутого цикла»:

□ до 70-х гг. XX века: основным способом утилизации отходов были мусорные свалки и полигоны;

□ 1976 г. Еврокомиссия сформулировала концепт циклической экономики: «от колыбели до могилы»;

□ 1982 г. ООН сформулировала принципы устойчивого развития, которые представляют собой триединство императивов: свободная экономика, справедливая социальная политика, бережное отношение к природным ресурсам;

□ В 1995 г. Николас Негропonte [18] сформулировал идею электронной экономики, основанной на переходе от обработки материальных элементов к обработке битов. Сегодня это полноценная концепция XXI века – цифровая экономика.

Однако необходимо указать на системную проблему, которая ограничивает развитие цифровой экономики вообще и экономику замкнутого цикла, в частности. Эта проблема заключается в том, что мы пытаемся с помощью цифровых методов обрабатывать «существующие бытовые и профессиональные языки, которые быстро становятся непригодными и их семантическая реконструкция бесперспективна. Тексты в книгах и других носителях текстов являются преградой социального развития из-за их семантической неоднозначности, неконструктивности и неоперационности» [19].

Еще в 1969 году С.П. Никаноров предложил идею генетического проектирования [19],

которая предполагает переход от «цифровизации» реальности к ее конструированию или синтезу на всех иерархических уровнях: элемент, объект, система. Этот принцип подразумевает наличие наборов концептуальных моделей (или генов организации) и схем манипулирования моделями для изменения проектной концепции организации в связи с изменившимися обстоятельствами. В этом случае сначала появляется цифровая модель, а уж потом материальные объекты: люди, отделы, кластеры и т.д. При таком подходе мы получим самосогласованный на уровне данных и цифровых моделей полностью контролируемый и управляемый процесс экономики замкнутого цикла, который естественным образом распространяется и на материальные объекты.

Развитие этих подходов было связано со многими субъективными и объективными сложностями. Однако разработанный им же в 2010 году аппарат абстрактной теории ступеней множеств, развитие вычислительной техники и языков программирования позволяет начать применять подходы генетического проектирования в экономике замкнутого цикла как в теории и практике [19].

В работе [23] показана логика использования генетического проектирования в формировании системы управления конкретной предметной областью, рис. 5. Наиболее разработан этап 3, который реализован инструментально в виде ситуационного центра на основе паттерна VSM Cenose [21, 22].

Ситуационный центр VSM Cenose является в этой схеме инвариантным триггером между

развиваемыми абстрактными областями этапов 1 и 2 и существующими сторонними разработками этапов 4 и 5. Это дает уверенность, что применяемые модели являются достаточно консервативными и будут применимы не только по вертикали сложности моделируемых организационных структур, но и горизонтали различных предметных областей.

Кластерная модель янтарной области естественным образом ложится на пятиуровневую иерархическую структуру ситуационного центра [9], рис. 6.

В результате можно следующим образом сформулировать суть генетического проектирования в экономике замкнутого цикла:

1. процесс создания любого изделия представляет собой стратегический проект, в основе которого четко сформулированная концепция со своей миссией, видением, стратегической целью, задачами, этапами реализации, включая эксплуатацию и утилизацию;
2. решение проблемы утилизации изделия генетически заложено в проекте его создания - проект генетически разворачивается из сформулированной концепции изделия и завершает свою миссию при полной его утилизации;
3. весь жизненный цикл изделия соответствует принципам устойчивого развития, то есть, оптимизации триады факторов: экономического, экологического и социального. Достоинство этой структуры заключается в том, что она реализована рекурсивно и поэтому можно добавлять любые новые субкластеры и объекты. При этом система управления как организационно, так и инструментально не изменится. Так же эта схема ситуационного центра может распространяться на уровень объекта и на уровень выше.

Тем самым создается возможность решения одной из ключевых задач цифровой экономики – создание системы распределенных ситуационных центров. Таким образом, генетическое проектирование является универсальным решением центральной задачи экономики замкнутого цикла.

Янтарная отрасль России находится на пороге больших перемен. Модернизация Калининградского Янтарного комбината, начатая Ростехом, может дать мультипликативный эффект в экономике Калининградской области и в отрасли в целом. Для этого необходимо применение современных технологий добычи и глубокой переработки янтаря и сопутствующих материалов, обеспечивающих более высокий ценовой уровень выпускаемой продукции, расширение продуктовой линии и переход на

цифровую экономику с использованием СЦ «Янтарь».

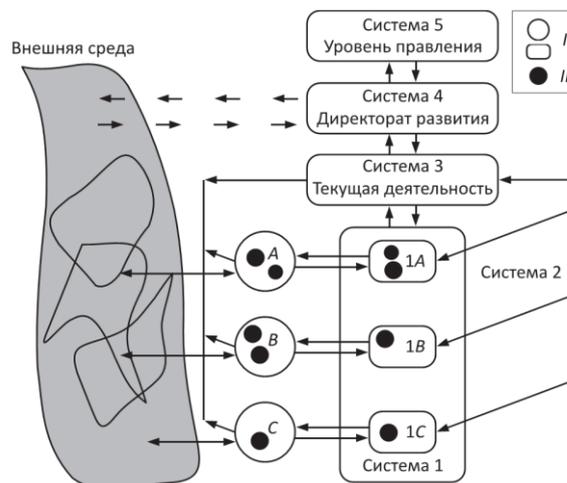


Рис.6. Схема управления ситуационным центром VSM Cenose: A, B, C – конкретные субкластеры; 1A, 1B, 1C – система 1 (выборные руководители субкластеров); система 2 – регулирование субкластеров; I - субкластеры; II - объект (МИП, ИП и др.)

Заключение

Особенности сложившейся уникальной ситуации в янтарной отрасли, когда монопольное владение уникальным природным ресурсом не проявляется в соответствующих позициях России на международном рынке янтарных изделий, диктуют необходимость коренной реорганизации как процессов добычи и переработки янтаря, поставок его на рынок, так и максимизацию переноса процессов переработки янтаря на территорию России, делая при этом акцент на глубокую и безотходную переработку не только янтаря, но и янтарь содержащих ценных пород: глауконита, монтмориллонита и др. минералов и субстанций. Многочисленные исследования показывают, что глауконит можно использовать с успехом в развитии производства экологически чистой продукции растениеводства и животноводства.

Отсюда следует актуальность проблемы технологической модернизации янтарной отрасли, в создании системы управления в янтарной отрасли в контексте Стратегии научно-технологического развития России и Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы.

Применение генетического проектирования в модернизации янтарной отрасли в парадигме экономике замкнутого цикла и инструментария Ситуационного центра не только обеспечит высокую конкурентоспособность предприятий отрасли на мировом рынке, выведет янтарную отрасль на новый уровень развития, соответствующего всем

принципам устойчивого развития, принятым международным сообществом, но и станет важным условием возвращения Калининградской области бренда «Янтарная столица мира».

Работа выполнена в рамках гранта

«Развитие НТИ-II», «Распределенная интеллектуальная система управления прибрежными инфраструктурными объектами и территориями на основе технологий ситуационных центров».

Литература

1. Michael O'Donoghue. Gems. Their Sources, Descriptions and Identification. Amsterdam. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2006. Sixth Edition: Grahame Brown The Biological Gem Materials . P.637. ISBN 13: 978-0-75-065856-0 ISBN 10: 0-75-065856-8
2. Manuel A. Iturralde-Vennet (2001). "Geology of the Amber-Bearing Deposits of the Greater Antilles" (PDF). Caribbean Journal of Science. 37 (3): 141–167.
3. Савкевич С. С. Янтарь. Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1970. 191 с.,
4. Космовская-Церанович, Б. Янтарь в Польше и мире. Amber in Poland and in the World. Bursztyn w Polsce i na świecie / Науч. ред. З. В. Костяшовой; ред. Н. Н. Мартынюк; перевод с польск. Т. М. Шкапенко, З. В. Костяшова. Монография, научное издание. Калининград: Калининградская книга: Промышленная типография «Бизнес-Контакт», Калининградский областной музей янтаря, 2017. 152 с.
5. Сребродольский Б. И. Мир янтаря / АН УССР; Отв. ред. д-р геол.-мин. наук Г. И. Каляев. — Киев: Наукова думка, 1988. 144 с.
6. Tomasz Piechal. The Amber Rush in Ukraine. OSW Commentary/ Centre for Eastern Studies NUMBER 241 | 08.05.2017 Электронный доступ: www.osw.waw.pl
7. Как Ровенские копатели ограбили Украину на 300 миллионов долларов // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://e-news.su/news/165694-kak-rovenske-kopateli-ograbil-ukrainu-na-300-millionov-dollarov.html> (дата обращения 20.11.2017).
8. Стратегия развития янтарной отрасли до 2024 года [Электронный ресурс] / Калининградская торгово-промышленная палата. – Режим доступа: <http://kaliningrad.tpprf.ru/ru/news/164695/> (дата обращения: 12.12.2016)
9. Н.А. Кострикова, А.С. Липская, А.Я. Яфасов. Кластерный подход к развитию янтарной отрасли, СЗИУ РАНХ и ГС, Управленческое консультирование, №3, 2017, стр.68-83. DOI 10.22394/1726-1139-2017-3-68-83.
10. Калининградский Янтарный комбинат досрочно выполняет годовой план // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://rostec.ru/news/4521471> (дата обращения 27.10.2017).
11. Годовая выручка Янтарного комбината приблизилась к 4 млрд рублей // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://news.rambler.ru/other/38482864/?utm_content=news&utm_medium=read_more&utm_source=copylink (дата обращения 20.11.2017).
12. Исследование емкости и потенциала мирового рынка янтаря. В разрезе стран. В разрезе видов янтаря. В разрезе видов продукции из янтаря. Прогноз развития рынка // Электрон. дан. Режим доступа URL: http://eurocmre.com/?page_id=579 (дата обращения 20.11.2017).
13. Ученым из КГТУ получен жидкий янтарь [Электронный ресурс] / Expert17.ru. – Режим доступа: <http://expert17.ru/news-by-region/kaliningradskaya-oblast/40555-uchenym-iz-kgtu-poluchen-zhidkiy-yantar.html> (дата обращения: 12.12.2016).
14. А.С. Липская. «Экономика замкнутого цикла: Pro&Contra», Доклад на Международном Форуме Европейских регионов, 27-29 марта 2017 г., Краков, Польша
15. Глауконит – ценный минерал для сельского хозяйства // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.agro-biz.ru/udobreniya/glaukonit-tsennyiy-mineral-dlya-selskogo-hozyaystva.html> (дата обращения 20.11.2017).
16. Рудмин М.А., Мазуров А.К., Макаров Б.И., Стеблецов М.Д., Чепала К.К. О возможности использования в сельском хозяйстве глауконита из пород Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 11. С 6–16.
17. Экономика замкнутого цикла (интервью с Вальтером Штахелем) // Электрон. дан. Режим доступа URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num12/art12_21/ (дата обращения 20.11.2017).
18. Цифровизация экономики // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://bit.samaq.ru/uart/more/67> (дата обращения 20.11.2017).
19. Никаноров С.П. Введение в аппарат ступеней множеств М.: Литературная Республика, 2013. 351 с.
20. Колесников А.В., Меркулов А.А. Программный продукт "Ситуационный центр VSM Cenose" Москва, ИПИ РАН, Системы и средства информатики, 2013, том 2, стр. 221-241.
21. Колесников А.В., Меркулов А.А. Технология управления жизненным циклом организации на основе подходов генетического проектирования. Светлогорск. Седьмая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии», 13-18 июня. 2017.с 369- 377
22. Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е.В., Яфасов А.Я., Платформа синтеза индивидуальных и системы распределенных ситуационных центров. Сборник тезисов «Всероссийский форум «Система распределенных ситуационных центров как основа цифровой трансформации государственного управления» СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2017.

References

1. Michael O'Donoghue. *Gems. Their Sources, Descriptions and Identification*. Amsterdam. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2006. Sixth Edition: Grahame Brownju *The Biological Gem Materials*. R.637. ISBN 13: 978-0-75-065856-0 ISBN 10: 0-75-065856-8
2. Manuel A. Iturralde-Vennet (2001). "Geology of the Amber-Bearing Deposits of the Greater Antilles" (PDF). *Caribbean Journal of Science*. 37 (3). Pp. 141–167.
3. Savkevich S. S. *Jantar' L.: Nedra, Leningradskoe otdelenie*, 1970. 191 p.
4. Kosmovskaja-Ceranovich, B. *Jantar' v Pol'she i mire. Amber in Poland and in the World*. Bursztyn w Polsce i na świecie / Nauch. red. Z. V. Kostjashovoj; red. N. N. Martynjuk; perevod s pol'sk. T. M. Shkapenko, Z. V. Kostjashova. Monografija, nauchnoe izdanie. Kaliningrad: Kaliningradskaja kniga: Promyshlennaja tipografija «Biznes-Kontakt», Kaliningradskij oblastnoj muzej jantartja, 2017. 152 p.
5. Srebrodol'skij B. I. *Mir jantartja / AN USSR; Otv. red. d-r geol.-min. nauk G. I. Kaljaev*. — Kiev: Naukova dumka, 1988. 144 p.
6. Tomasz Piechal. *The Amber Rush in Ukraine*. OSW Commentary/ Centre for Eastern Studies NUMBER 241 | 08.05.2017 Jelektronnyj dostup: www.osw.waw.pl
7. *Kak Rovenske kopateli ograbili Ukrainu na 300 millionov dollarov // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://e-news.su/news/165694-kak-rovenskie-kopateli-ograbili-ukrainu-na-300-millionov-dollarov.html> (data obrashhenija 20.11.2017).*
8. *Strategija razvitija jantarnoj otrasli do 2024 goda [Jelektronnyj resurs] / Kaliningradskaja trgovopromyshlennaja palata. – Rezhim dostupa: <http://kaliningrad.tpprf.ru/ru/news/164695/> (data obrashhenija: 12.12.2016)*
9. N.A. Kostrikova, A.S. Lipskaja, A.Ja. Jafasov. *Klasternyj podhod k razvitiyu jantarnoj otrasli, SZIU RANH i GS, Upravlencheskoe konsul'tirovanie, №3, 2017, str.68-83. DOI 10.22394/1726-1139-2017-3-68-83.*
10. *Kaliningradskij Jantarnyj kombinat dosrochno vypolnjaet godovoj plan // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://rostec.ru/news/4521471> (data obrashhenija 27.10.2017).*
11. *Godovaja vyruchka Jantarnogo kombinata priblizilas' k 4 mlrd rublej // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: https://news.rambler.ru/other/38482864/?utm_content=rnews&utm_medium=read_more&utm_source=copylink (data obrashhenija 20.11.2017).*
12. *Issledovanie emkosti i potenciala mirovogo rynka jantartja. V razreze stran. V razreze vidov jantartja. V razreze vidov produkcii iz jantartja. Prognoz razvitija rynka // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: http://eurocmre.com/?page_id=579 (data obrashhenija 20.11.2017).*
13. *Uchenym iz KGTU poluchen zhidkij jantar' [Jelektronnyj resurs] / Expert17.ru. – Rezhim dostupa: <http://expert17.ru/news-by-region/kaliningradskaya-oblast/40555-uchenym-iz-kgtu-poluchen-zhidkiy-yantar.html> (data obrashhenija: 12.12.2016).*
14. A.S. Lipskaja. «Jekonomika zamknutogo cikla: Pro&Contra», *Doklad na Mezhdunarodnom Forume Evropejskih regionov, 27-29 marta 2017 g., Krakov, Pol'sha*
15. *Glaukonit – cennyj mineral dlja sel'skogo hozjajstva // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://www.agro-biz.ru/udobreniya/glaukonit-tsennyiy-mineral-dlya-selskogo-hozyaystva.html> (data obrashhenija 20.11.2017).*
16. Rudmin M.A., Mazurov A.K., Makarov B.I., Steblecov M.D., Chepala K.K. *O vozmozhnosti ispol'zovanija v sel'skom hozjajstve glaukonita iz porod Bakcharskogo mestorozhdenija (Zapadnaja Sibir) // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2016. T. 327. № 11. Pp. 6–16.*
17. *Jekonomika zamknutogo cikla (interv'ju s Val'terom Shtahalem) // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num12/art12_21/ (data obrashhenija 20.11.2017).*
18. *Cifrovizacija jekonomiki // Jelektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://bit.samag.ru/uart/more/67> (data obrashhenija 20.11.2017).*
19. Nikanorov S.P. *Vvedene v apparat stupenej mnozhestv M.: Literaturnaja Respublika, 2013. 351 p.*
20. Kolesnikov A.V., Merkulov A.A. *Programmnyj produkt "Situacionnyj centr VSM Cenose" Moskva, IPI RAN, Sistemy i sredstva informatiki, 2013. T 2. Pp. 221-241.*
21. Kolesnikov A.V., Merkulov A.A. *Tehnologija upravlenija zhiznennym ciklom organizacii na osnov e podhodov geneticheskogo proektirovanija. Svetlogorsk. Sed'maja mezhdunarodnaja konferencija «Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii», 13-18 ijunja. 2017. Pp. 369- 377*
22. Majtakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Jafasov A.Ja., *Platforma sinteza individual'nyh i sistemy raspredelennyh situacionnyh centrov. Sbornik tezisov «Vserossijskij forum «Sistema raspredelennyh situacionnyh centrov kak osnova cifrovoj transformacii gosudarstvennogo upravlenija» SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2017).*

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 532.5.13, 539.3, 519.61, 639.2.081.117.21

ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРАЛОВЫХ СИСТЕМ**Волкогон Владимир Алексеевич**

ректор

Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: rector@klgtu.ru**Недоступ Александр Алексеевич**кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru**Ражев Алексей Олегович**соискатель кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: progacpp@live.ru**Кострикова Наталья Анатольевна**кандидат физико-математических наук, проректор по научной работе
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: : natalia.kostrikova@klgtu.ru**Поляков Руслан Константинович**кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики сельского и рыбного хозяйства,
начальник управления научно-исследовательской деятельности
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru**Кузин Владимир Иванович**кандидат экономических наук, доцент кафедры отраслевых и корпоративных финансов, директор
аналитического центра
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: vladimir.kuzin@klgtu.ru**Аннотация**

В статье рассмотрено обоснование создания в Калининградском государственном техническом университете тренажерного комплекса для проектирования и моделирования динамических процессов в траловых комплексах, областью применения которого является как проектирование и эксплуатация траловых систем, так и процесс обучения. Дана их классификация, указаны положительные стороны при использовании в процессе обучения. Рассмотрена текущая ситуация на мировом рынке тренажерной техники и систем проектирования траловых комплексов. Указаны сегменты рынка, на которые ориентирован разрабатываемый продукт. Указаны основные игроки, предлагающие аналогичные продукты на мировом рынке. Проведена их сравнительная оценка с разрабатываемым тренажерным комплексом. Указаны цели и задачи, на решение которых направлен комплекс, а это проектирование, моделирование, эксплуатация и обучение; описан учебный процесс с его использованием. Определены основные технические характеристики оборудования тренажера. В статье также описана структура комплекса, его математическая база и программные алгоритмы (математические и имитационные модели), инструменты, которые планируется использовать при разработке программного обеспечения тренажерного комплекса. Особо отмечены такие преимущества комплекса перед конкурентами, как поддержка стерео-зрения и различных игровых манипуляторов. Описано взаимодействие компонент комплекса посредством

сетей и баз данных. В конце статьи приведены основные и сопутствующие результаты проекта, а также основные конкурентные преимущества.

Ключевые слова: проектирование, конструирование, моделирование, управление, трал, гидродинамика, гетерогенная система, АРМ

JUSTIFICATION OF CREATION OF A TRAINING COMPLEX FOR DESIGNING AND SIMULATION OF TRAWL SYSTEMS

Volkogon Vladimir Alekseevich

rector

Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: rector@klgtu.ru

Nedostup Alexander Alekseevich

PhD, associate professor of the industrial fisheries department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Razhev Aleksey Olegovich

research scholar of the industrial fisheries of department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: progacpp@live.ru

Kostrikova Natalia Anatolievna

PhD, vice-rector for research
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Polyakov Ruslan Konstantinovich

PhD, associate professor of the economy of agriculture and fisheries department, head of the research activities department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: ruslan.polyakov@klgtu.ru

Kuzin Vladimir Ivanovich

PhD, director of analytical center, director of the analytical center
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vladimir.kuzin@klgtu.ru

Abstract

This article describes the rationale for creation of a simulator complex for the design and modeling of dynamic processes in trawl complexes in the Kaliningrad State Technical University, the scope of which is both the design and operation of trawl systems and the training process. Their classification is given in the article and the pros are indicated when used in the training process. The current situation in the world market of simulators and systems for designing trawl complexes is considered. We defined the intended segments of the market to which the product is developed as well as indicated the main players who offer similar products on the world market. The comparative evaluation of simulator complexes of the main players was carried out. We specified the goals and tasks which can be solved with the developed complex, such as design, modeling, operation and training; the educational process with the usage of the complex is described. In the article the main technical characteristics of the simulator equipment are determined. The article also describes the structure of the complex, its mathematical base and software algorithms (mathematical and simulation models), tools that are planned to be used in the development of software for the training complex. Particularly noted are such advantages of the complex in front of competitors, as support for stereo-vision and various game manipulators. Interaction of components of a complex by means of networks and databases is described. At the end of the article we presented the main and accompanying results of the project, as well as the main competitive advantages.

Keywords: design, construction, simulation, control, trawl, hydrodynamics, heterogeneous system, WKS

Введение

Системы автоматизированного проектирования и различные тренажерные комплексы широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе и морских. В морском и речном флоте тренажерные комплексы используются как в процессе проектирования и эксплуатации, так и для подготовки специалистов и береговой охраны.

Применительно к рыбопромысловым тренажерам и системам автоматизированного проектирования и моделирования процессов и орудий рыболовства в целом и тралового лова в частности в настоящий момент складывается следующая ситуация на мировом рынке:

- Транзас: 45% - мирового рынка профессиональных морских тренажеров, более 5500 тренажерных систем установлены в учебно-тренажерных центрах в 106 странах;

- прочие компании: Ifremer (Франция) / «ДунамиТ», SINTEF (Дания) / «CadTrawl», SINTEF (Дания) / «CATS», AcruxSoft (Уругвай) / «Trawl Vision PRO», Marine Production System Laboratory (Южная Корея) / «SimuTrawl» и др.

Морские тренажерные комплексы можно разделить на:

- навигационные тренажеры;
- тренажеры ГМССБ;
- тренажеры машинного отделения и грузобалластных операций;
- тренажеры крановых операций.

В процессе обучения пользователь проходит основные этапы познавательной деятельности: восприятие, первоначальное знакомство; осмысление, закрепление, контроль знаний; формирование профессионально-ориентированных умений и навыков; развитие интуиции.

Положительные стороны применения тренажера в учебном процессе.

- возможность совмещать лекции и лабораторные работы как по времени, так и по теме;
- способствует повышению качества образования, экономии ресурсов, безопасности, экологии.

Необходимость создания нового отечественного тренажерного комплекса для процесса обучения вызвана следующим. По данным [1,2] общее количество:

- образовательных учреждений во всем мире, которые готовят специалистов с высшим и средним профессиональным образованием – 296 (см. рис. 1);

- студентов и курсантов (КЦП 2017/2018, бюджетной формы обучения) в России – 4476 человек;
- крупных предприятий по постройке тралов во всем мире – 100;
- рыболовных судов во всем мире, которые ловят тралами – 2600;
- крупных предприятий во всем мире, которые проектируют тралы – 30;
- рыбаков в мире (по данным ФАО, 2016) - 56605 тысяч человек;
- объем подготовки в наших отраслевых вузах – 55 тысяч молодых специалистов в год, при этом основной контингент – 38 тысяч человек – это курсанты, которые проходят подготовку по специальностям плавсостава.

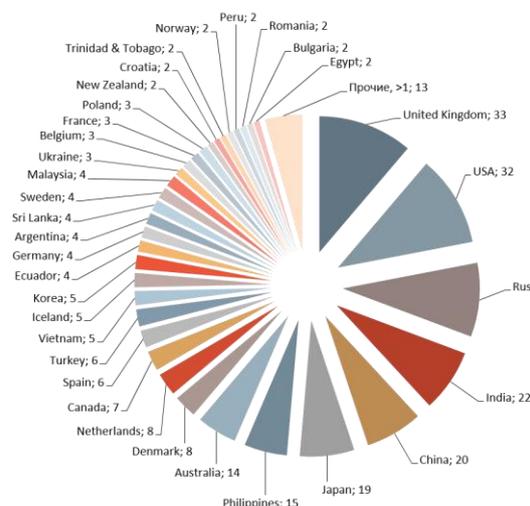


Рис. 1. Морские и рыболовные учебные заведения мира

Сегменты рынка, на который ориентирован продукт – образовательные организации, производственные предприятия, рыбооловецкие организации и частные лица. Большое внимание будет уделено содержанию обучения, разработке профессиональных и государственных образовательных стандартов. Так, например, в довольно сложной экономической ситуации Росморречфлот продолжает активное обновление тренажерной базы вузов и филиалов как основного элемента практической подготовки плавсостава. Только в текущем 2017 году было закуплено тренажеров на сумму 330 млн. рублей [3].

Основные преимущества разрабатываемого тренажера перед мировыми аналогами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные конкуренты

Характеристика	Ifremer (Франция) / «DynamiT»	SINTEF (Дания) / «CadTrawl»	SINTEF (Дания) / «CATS»	Тренажерный комплекс моделированию, проектированию и управлению траловым комплексом	AcruxSoft (Уругвай) / «Trawl Vision PRO»	Marine Production System Laboratory (Южная Корея) / «SimuTrawl»
Пользовательский интерфейс	понятный, лаконичный, удобный	понятный, лаконичный, удобный	сложный	понятный, лаконичный, удобный, поддержка игровых манипуляторов, поддержка нескольких языков, параллельное выполнение задач	понятный, лаконичный, удобный	сложный
Реалистичность	высокая	низкая	низкая	высокая, стереозрение, звуковое сопровождение	высокая	высокая
Точность	средняя	низкая	низкая	Высокая	низкая	высокая
Конструирование	чертежи тралов	чертежи тралов	чертежи тралов	чертежи орудий рыболовства и деталей оснастки, документы, база моделей и материалов	чертежи тралов	чертежи тралов
Проектирование	только тралов	нет	нет	тралов и др. орудий рыболовства, деталей оснастки, компоновка, районы промысла, палубная команда	только тралов	только тралов
Моделирование	траулер и трал	нет	нет	траулер, контроль улова, промысловые механизмы, навигационные приборы, палубная команда	траулер и трал	траулер и трал
Управление	нет	нет	нет	траулер, трал, контроль улова, промысловые механизмы, навигационные приборы, палубная команда, промжурнал	нет	нет
Стоимость	высокая	высокая	высокая	в зависимости от конфигурации от 75 тыс. руб.	высокая	высокая
Доля рынка	6 стран	5 стран	5 стран	стадия разработки	10 стран	Две страны

1. Цель и задачи

Целями создания собственного тренажерного комплекса, включающего систему автоматизированного проектирования сетных орудий рыболовства и их элементов, сквозной подготовки конструкторской и другой сопутствующей документации (документоотбора), а также управления процессом лова являются:

- необходимость импортозамещения программного обеспечения. (по данным Минкомсвязи РФ плановый размер отрасли

программного обеспечения на 2020 г. по базовому сценарию должен составить 410 млрд. руб.);

- уменьшение влияния человеческого фактора;
- автоматизация процессов управления траловыми системами по математическим моделям – на данный момент в основном применяется только информационные системы;
- автоматизация документоотбора на площадке Интернета;

- увеличение эффективности подготовки кадров;
- увеличение эффективности тралового лова – при увеличении ошибки наведения трала в 2 раза относительная прибыль уменьшается в 2 раза;
- уменьшение трудоемкости при траловом лове – например, при уменьшении длины трала можно достичь уменьшения времени лова до 10% (патент SU1824130A1);
- сокращение времени на непроизводительные операции;
- уменьшение численности палубной команды;
- уменьшение энергозатрат при траловом лове;
- совершенствование промысловых схем;
- пополнение математической и алгоритмической базы;
- увеличение точности математических и имитационных моделей.

В связи с этим Калининградским государственным техническим университетом по инициативе авторов статьи поставлена цель разработать отечественный тренажерный комплекс по проектированию и моделированию траловых систем, не имеющий аналогов в мире для последующего внедрения в учебный процесс, разработку и эксплуатацию в российских и зарубежных учебных заведениях, конструкторских бюро и на производстве.

Достижимость цели подтверждается большим научно-техническим заделом, экспериментальной базой и опытом команды предполагаемых исполнителей (см. рис. 2). По данной теме авторами статьи разработаны и зарегистрированы 33 компьютерные программы по схематизации, расчету и моделированию орудий и процессов рыболовства, получен патент № 2323572 «Распорная траловая доска», выпущено шесть монографий, шесть учебных пособий, опубликовано более 200 статей.



Рис. 2. Научно-технический задел

Разрабатываемый тренажерный комплекс предназначен для решения большого круга задач по проведению численных экспериментов (моделированию), проектированию и управлению траловым комплексом, ведению базы данных документов, конструкторских и математических моделей элементов тралового комплекса (как локальной, так и удаленной распределенной), журналов и программ обучения, топологии места лова (карт районов промысла), промрасписания (расстановки команды), доступа к базе данных.

Процесс обучения на тренажере схематически показан на рис. 3.



Рис. 3. Работа тренажера в режиме обучения

Основные характеристики учебного процесса с использованием тренажера:

- Проведение численных экспериментов без непосредственного контакта с траловым комплексом;
- Динамика процессов реализуется посредством вывода анимации (стерео-анимации) и звукового сопровождения;
- Учебная лаборатория сочетает имитационную (виртуальную) модель траловой системы и методическое сопровождение лабораторной работы (в режиме ученик-экзаменатор);
- Средства управления регулируют заданные входные параметры (в соответствии с заданием);
- Математическая модель просчитывает выходные параметры, имитируя процесс лова.

2. Материалы и методы

Тренажерный комплекс является программно-техническим средством. Основой комплекса является один или несколько ЭВМ с архитектурой x86_64 и операционной системой Microsoft Windows версии 10 или более поздней, с установленной одной или несколькими графическими платами с аппаратной поддержкой DirectX версии 11 или более поздней. Обмен данными между ЭВМ (в случае, если их несколько) осуществляется посредством сети Ethernet.

Новизной исследования является использование при создании математических и имитационных моделей метода взаимодействующих частиц, что позволяет уменьшить сложность математических уравнений за счет увеличения количества простых однотипных уравнений, способных решаться одновременно в многоядерной, гетерогенной (распределение вычислений между центральными и графическими процессорами) и распределенной системах.

Опишем подробнее основные задачи комплекса, которые по мнению авторов должны удовлетворить потребность в таких областях, как образование, проектирование и эксплуатация.

Проектирование траловых комплексов и их элементов, ведения конструкторской докумен-

тации, управления базой данных документов, конструкторских и имитационных моделей элементов тралового комплекса. Данная задача для своего решения предполагает использование следующего комплекса программных средств:

- САПР «Конструктор твердотельных элементов» – создание и редактирование конструкторской документации, чертежей деталей тралового комплекса, сборочных чертежей, трехмерных моделей элементов тралового комплекса, свойств материалов деталей; ведение базы данных.
- САПР «Конструктор канатно-веревочных изделий» - создание и редактирование конструкторской документации, чертежей деталей из канатно-веревочных изделий (КВИ), сборочных чертежей, свойств материалов КВИ; ведение базы данных.

Численные эксперименты (моделирование) - для моделирования траловых комплексов и их элементов с использованием имитационных моделей из базы данных. Данная задача для своего решения предполагает использование следующего комплекса программных средств:

- Приложение для расчета тралового комплекса и его элементов на прочность при заданных условиях окружающей среды; формирование отчетов; ведение базы данных.
- Приложение для расчета гидродинамических характеристик тралового комплекса и его элементов при заданных условиях окружающей среды; формирование отчетов; ведение базы данных.
- Приложение для моделирования динамики тралового комплекса (управления траловым комплексом) и его элементов при заданных условиях окружающей среды; формирование отчетов; ведение базы данных.

Эксплуатация - для отработки процессов управления траловым комплексом в процессе эксплуатации с использованием симуляторов навигационных и промысловых приборов (гидролокатор, эхолот, траловый зонд, прибор контроля улова), топологии места лова (карт районов промысла), промрасписания (расстановки команды) и имитационных моделей из базы данных. Данная задача для своего решения предполагает использование следующего комплекса программных средств:

- Редактор топологии места лова (рельефа и шероховатости дна); формирование отчетов; ведение базы данных.
- Симулятор процессов тралового лова (управление траулером и промысловыми устройствами), навигационных и промысловых приборов при заданных условиях окружающей среды, в заданном регионе (имеющимся в базе данных), по заданному промрасписанию и заданных пространственно-временных

характеристиках и концентрации гидробионтов.

Обучение - для отработки процессов управления траловым комплексом при обучении с использованием симуляторов навигационных и промысловых приборов (гидролокатор, эхолот, траловый зонд, прибор контроля улова), топологии места лова (карт районов промысла), промрасписания (расстановки команды) и имитационных моделей из базы данных. Данная задача для своего решения предполагает использование следующего комплекса программных средств:

- Редактор топологии места лова (рельефа и шероховатости дна); формирование отчетов; ведение базы данных.
- Симулятор процессов тралового лова (управление траулером и промысловыми устройствами), навигационных и промысловых приборов при заданных условиях окружающей среды, в заданном регионе (имеющимся в базе данных), по заданному промрасписанию и заданных пространственно-временных характеристиках и концентрации гидробионтов.
- АРМ лаборанта – для управления (назначения заданий) процессом обучения и его протоколирования (ведения журналов); формирование отчетов; ведение базы данных.

Разрабатываемый комплекс будет иметь модульную архитектуру (см. рис. 4).



Рис. 4. Модульная структура

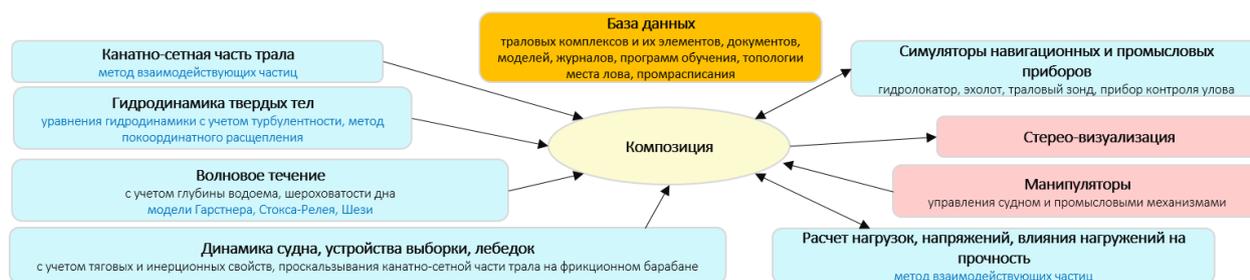
Для выполнения указанных задач в составе комплекса будут использоваться следующие основные конфигурации: АРМ конструктора, АРМ проектировщика, АРМ кораблестроителя, АРМ судоводителя, АРМ промыслова, АРМ студента и курсанта, АРМ лаборанта, АРМ исследователя.

В процессе разработки математических и программных моделей [4-7] (см. рис. 5) динамических процессов, происходящих в траловых системах в процессе рыболовства будет использована математическая модель взаимодействующих частиц (точечных масс) и метод конечных элементов применительно к канатно-сетной части трала в композиции с математическими моделями:

- движения твердых тел произвольной формы в потоке жидкости, таких как распорные траловые доски и траулер, основанной на системах дифференциальных уравнений в частных производных Навье-Стокса с учетом полей скорости (векторного), давления и вязкости (для учета турбулентности);
- волнового течения с учетом глубины водоема, шероховатости дна (по Шези), основанной на моделях Гарстнера и Стокса-Релея.

Алгоритмически композиция с твердым телом будет реализована при помощи табличных

преобразований трехмерных векторов мгновенных скоростей (поступательной, вращательной) в силы и крутящие моменты, действующие со стороны твердого тела на канатно-сетную часть трала в контрольных точках с интерполяцией промежуточных значений. Таблица преобразований будет построена отдельной стадией моделирования гидродинамики твердотельного элемента отдельно для каждого его типа и размеров, и для всех возможных скоростей. Данные таблицы будут занесены в базу данных и в последствии ассоциироваться с элементом на основном этапе моделирования.



• Рис. 5. Математическая и программная модели

Выходные силовые характеристики (натяжения в нитевидных элементах (нитках, веревках, канатах, ...), поле давлений на поверхности распорных траловых досок и траулера), полученные при помощи разработанных математических моделей динамических процессов, происходящих в траловых системах, будут использованы на входе математических моделей расчета нагрузок на элементы и конструкцию элементов тралового комплекса и влияния нагрузений на прочность текстильных рыболовных нитевидных материалов. При расчете напряжений предполагается использование метода конечных элементов.

При разработке математических и имитационных (алгоритмов) моделей управления траловой системой (управления судном, устройством выборки, лебедками) будут учтены тяговые и инерционные свойства судна, устройства выборки, лебедок, учтена возможность проскальзывания канатно-сетной части трала на фрикционном барабане при выборке, инерционные свойства охватываемой судном жидкости; будет разработана композиция математических моделей управления траловой системой и канатно-сетной частью трала.

Алгоритмически композиция будет реализована при помощи табличного преобразования трехмерных векторов мгновенных скоростей судна (поступательной, вращательной) в силы и крутящие моменты, действующие со стороны судна на канатно-сетную часть трала в контрольных точках (соприкосновение ваера с элементами судна) с интерполяцией промежуточных значений.

Таблица преобразований будет построена отдельной стадией моделирования гидродинамики судна отдельно для каждого его типа, и для всех возможных скоростей. Данные таблицы будут занесены в базу данных и в последствии ассоциироваться с судном на основном этапе моделирования.

Основываясь на конструкторской документации, руководствах пользователя, а также другой доступной информации, будут разработаны программные модули симуляторов навигационных и промысловых приборов (гидролокатор, эхолот, траловый зонд, прибор контроля улова).

Современные персональные компьютеры широкого применения и графические станции имеют в своем составе хотя бы одну плату с графическим процессором (GPU). В связи с этим данная оптимизация вычислений совместно с композицией посредством табличного преобразования позволит на персональном компьютере моделировать динамику тралового комплекса в реальном времени при трехмерной постановке задачи.

При разработке программного обеспечения в качестве языков программирования будут использованы языки C++, Assembler и язык HLSL для создания кода шейдеров (кода, работающего на графическом процессоре), работающих под управлением DirectX. В качестве инструментов разработки будут использованы среды разработки программных продуктов RAD Studio с библиотеками VCL и FMX, и Microsoft Visual Studio.

Все программы для ЭВМ по моделированию, проектированию и управлению траловым

комплексом будут отображать результаты в трехмерном виде с поддержкой стерео-зрения (в случае наличия стереоскопического устройства отображения (3D-монитор, 3D-телевизор, 3D-проектор), поддерживаемого операционной системой Windows 10). В программах в качестве органов управления процессами лова будет реализована поддержка таких устройств ввода, как клавиатура, манипулятор «мышь» и различных игровых манипуляторов, поддерживаемых операционной системой Windows 10.

Для взаимодействия приложений, входящих в состав комплекса, будет создана и размещена в Интернете в режиме ограниченного доступа база данных, содержащая информацию о существующих траловых комплексах и их составных элементах, документов, трехмерных математических моделей элементов тралового комплекса, журналов и программ обучения, топологии места лова, промрасписания, что даст возможность ее централизованного обновления и обеспечит к ней доступ из разработанного программного обеспечения.

3. Результаты

- Научно-техническая база;
- Программное обеспечение тренажера;
- Электронная база данных;
- Документация на тренажер;
- Сайт продукта;
- Нормативно-правовые документы;

- Внедрение в учебный процесс в 10 учебных заведениях рынка МариНет;
- Основные конкурентные преимущества:
- Поддержка стерео-зрения;
 - Звуковое сопровождение;
 - Поддержка игровых манипуляторов;
 - Возможность проводить исследования по оптимизации всех процессов тралового лова;
 - Управление траулером и промысловыми механизмами;
 - Симуляция реального навигационного и промыслового оборудования;
 - Моделирование промысловой команды с учетом охраны труда;
 - Ведение промыслового журнала;
 - Онлайн база данных конструкторской документации и математических моделей;
 - Низкая стоимость.

Выводы

В статье представлена текущая ситуация на рынке тренажерной техники и систем проектирования траловых комплексов, анализ которой с учетом указанных преимуществ разрабатываемого изделия, новизны, а также с необходимостью импортозамещения, указывает на целесообразность разработки.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ №15-08-00464-а.

Литература

1. MIDSHIPS. Каталог морских учебных заведений мира [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: <http://www.midships.ru/Catalog/organizations/morskie-uchebnie-zavedeniya-mira.html> (дата обращения 30.10.2017)
2. WIKIPEDIA. Каталог морских учебных заведений мира [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_maritime_colleges (дата обращения 30.10.2017)
3. KORABEL. Каталог морских учебных заведений мира [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: https://www.korabel.ru/news/comments/sudostroiteli_i_transportniki_-_blizkie_soyuzniki.html (дата обращения 30.10.2017)
4. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - С. 154-157.
5. Недоступ А.А., Ражев А.О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - С. 168-173.
6. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.
7. Недоступ А.А., Ражев А.О. Расчет сил гидродинамического сопротивления сетных орудий рыболовства в задачах имитационного их моделирования. Известия КГТУ. №42. - 2016. - С. 185-192.

References

1. <http://www.midships.ru/Catalog/organizations/morskie-uchebnie-zavedeniya-mira.html>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_maritime_colleges
3. https://www.korabel.ru/news/comments/sudostroiteli_i_transportniki_-_blizkie_soyuzniki.html

4. Nedostup A.A., Razhev A.O. A mathematical model of interaction of the trawl door with the aquatic environment. *Marine Intelligent Technologies*. №3(37) Т.1. 2017. - p. 154-157.
5. Nedostup A.A., Razhev A.O. Software to study hydrodynamics of the otter doors. *Морские интеллектуальные технологии. Marine Intelligent Technologies*. №3(37) Т.1. 2017. - p. 168-173.
6. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.
7. Nedostup A.A., Razhev A.O. Calculation of the forces of hydrodynamic resistance of net fishing gears in the tasks of simulation of their modeling. *Izvestia of KSTU*. №42. - 2016. - p. 185-192.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ,
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 532.5.013.12:629.5

**ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОДЪЕМА ГРУЗА ИЗ ВОДЫ ЛЕБЕДКОЙ
С ПОМОЩЬЮ СИНТЕТИЧЕСКОГО КАНАТА****Борис Аркадьевич Альтшуль**

доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1

Владимир Аркадьевич Наумов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: van-old@mail.ru

Аннотация

Подъем грузов из воды с помощью канатно-тросовых систем широко используется в морской индустрии. Все большее распространение получает применение в таких системах синтетических канатов. Большая часть опубликованных результатов исследований посвящена изучению характеристик стальных тросов. Доказано, что относительное удлинение синтетических канатов зависит от нагрузки нелинейно. Влияние нелинейного характера зависимости на динамику подъема груза из воды не исследовано до настоящего времени. Анализ результатов лабораторных испытаний позволил найти эмпирические параметры нелинейной характеристики нагрузка-удлинение канатов из полиамида, полистила, полипропилена. Степень нелинейности s зависит от материала и состояния каната. Для 3-рядных крученых канатов значение s составило от 1,67 до 1,83. В статье получена безразмерная система уравнений динамики вертикального подъема груза из воды лебедкой с помощью синтетического каната. Рассматриваемая задача динамики имеет 6 критериев подобия, в том числе относительную длину каната и показатель степени нелинейной характеристики s . Исследовано влияние критериев подобия на динамику механической системы. Увеличение значения s наибольшее влияние оказывает на относительное удлинение каната, при этом угловая скорость вращения барабана дольше устанавливается.

Ключевые слова: синтетический канат, лебедка, подъем груза, критерии подобия.

**DYNAMICS OF VERTICAL CARGO LIFT OUT OF THE WATER
BY THE WINCH WITH SYNTHETIC ROPE****Boris A. Al'tshul'**

Dr.Sci.Tech., professor
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation

Vladimir A. Naumov

professor, Dr.Sci.Tech., head of the water resources & water use department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: van-old@mail.ru

Abstract

The cable-tethered systems lifting out of water is widely used in marine industry. The usage of synthetic ropes in such a systems becomes more common. A large part of published studies devoted to the study of the characteristics of steel wire ropes. It is proved that the elongation of synthetic ropes and the load have nonlinear dependence. The influence of nonlinear dependence on the dynamics of hoisting was not investigated until the present time. Analysis of the laboratory tests results allowed us to find empirical parameters of the nonlinear characteristics of the load-elongation ropes made of polyamide, polistil, polypropylene. The degree of non-linearity of s depends on the material and

condition of the rope. For the 3-strand twisted ropes, the value of s was of 1.67 to 1.83. In the paper we developed dimensionless system of equations of the dynamics of vertical cargo lift out of the water with the help of winch with synthetic rope. The problem of dynamics has 6 similarity criteria, including the relative length of the rope and the exponent of the nonlinear characteristics of s . The influence of similarity criteria on the dynamics of the mechanical system was studied. The increase in the s value has the greatest influence on the elongation of the rope, in this situation the angular speed of the wheel is set longer.

Keywords: synthetic rope, cargo lift, dynamics, similarity criteria.

Введение

Подъем груза из воды с помощью различных канатно-тросовых систем широко используется в морской индустрии [1-4]. В настоящее время использование в подъемных механизмах канатов из синтетических материалов получает все большее распространение [5]. Тогда как большая часть опубликованных результатов исследований посвящена изучению упругой и пластической деформации, статических и динамических усилий, усталостной прочности и др. характеристик стальных тросов.

В [3] исследовано влияние критериев подобия на динамику вертикального подъема груза из воды с учетом упругости троса, считая, что механическая система имеет две степени свободы. Однако использованная в [3] модель содержит противоречия. Для упрощения сделаны допущения: массой троса можно пренебречь, зависимость силы натяжения от удлинения – линейная. Первое характерно для канатов их стальных тросов. Второе отличает синтетических материалов, второе отличает стальные тросы. Доказано (см., например, [6]), что относительное удлинение синтетических канатов зависит от нагрузки нелинейно, даже при небольшой ее величине. Влияние такого нелинейного характера зависимости на процесс подъем груза из воды не исследовано.

1. Цель и задачи исследования

Цель статьи – разработка математической модели механической системы вертикального подъема груза из воды с помощью лебедки с учетом эластичности синтетического каната.

Задачи исследования:

- расчет эмпирических параметров нелинейной характеристики нагрузка-удлинение канатов из различных синтетических материалов по результатам лабораторных испытаний;
- математическая постановка задачи динамики механической системы лебедка – синтетический канат – груз;
- решение численным методом поставленной задачи при различных значениях критериев подобия.

2. Характеристика нагрузка-удлинение

В [6] был проведен анализ результатов большого количества лабораторных испытаний и показано, что зависимость удлинения канатов из синтетических материалов ε от относительной нагрузки p можно представить формулой (1):

$$\varepsilon = A_i \cdot p^{n_i} = A_i \cdot (F/P_i)^{n_i}, \quad \varepsilon = X/L_0, \quad (1)$$

где X – абсолютное удлинение каната; L_0 – исходная длина каната; p – отношение силы в канате F к разрывному усилию P_i ; A_i, n_i – эмпирические параметры, зависящие от материала, типа и состояния каната.

На рис. 1 в качестве примера показана зависимость относительного удлинения 3-прядных крученых канатов из полиамида от безразмерной нагрузки. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

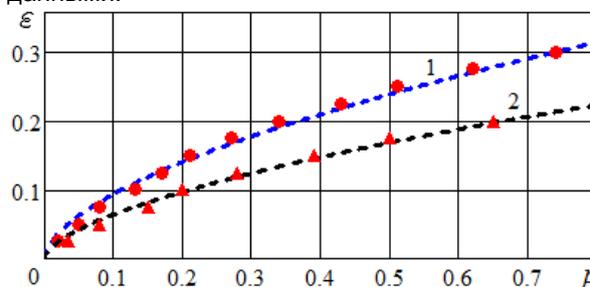


Рис. 1. Характеристика нагрузка-удлинение канатов из полиамида: 1 – новые канаты, 2 – порабатавшие. Точки – опытные данные [7], линии – расчет по (1)

Зависимость статического разрывного усилия синтетического каната от его диаметра может быть описана степенной зависимостью [6] (2):

$$P_i(d) = B_i \cdot d^{m_i}, \quad (2)$$

где P_i – статическое разрывное усилие i -го типа канатов, кН; d – диаметр каната, мм; B_i, m_i – эмпирические коэффициенты.

Из (1)-(2) получим формулу (3):

$$F = P \cdot (\varepsilon/F)^s = \theta \cdot (\bar{d})^m \cdot (X/L_0)^s, \quad (3)$$

$$\bar{d} = d/d_0, \quad s = 1/n, \quad \theta = 10^3 \cdot B \cdot d_0^m / A^s.$$

В таблице 1 представлены эмпирические коэффициенты, найденные для 3-прядных порабатавших канатов из указанных материалов. За базовое значение принят диаметр $d_0 = 10$ мм.

Таблица 1

Коэффициенты 3-прядных крученых канатов

Коэффициент	Материал канатов		
	Полиамид	Полистиол	Полипропилен
A	0,255	0,118	0,115
n	0,601	0,613	0,534
m	1,902	1,860	1,865
s	1,664	1,631	1,873
θ , кН	210,9	591,1	888,4

Заметим, что значение m для разных материалов и типов канатов различается

незначительно, тогда как s может заметно изменяться.

3. Математическая постановка задачи

3.1. Система дифференциальных уравнений

Пусть вес груза в воде равен G . Радиус барабана лебедки r_0 , осевой момент инерции J . Приложенный к барабану момент зависит от угловой скорости Ω по приближенной формуле (4):

$$M(\Omega) = M_0 - B\Omega, \quad (4)$$

где $M_0/B = \Omega_*$ – установившаяся угловая скорость барабана лебедки на холостом ходу.

Начальная угловая скорость барабана равна нулю. Начальная длина троса L_0 . В первом приближении полагаем, что массой троса, его силой гидродинамического сопротивления можно пренебречь.

В качестве обобщенных координат выбираем угол поворота барабана лебедки ψ и удлинение троса X . Абсолютная скорость движения груза может быть найдена по формуле (5)

$$U = \Omega \cdot r_0 - \dot{X} = \dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X}. \quad (5)$$

Сила гидродинамического сопротивления (6):

$$R_x = -a \cdot |\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X}| \cdot (\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X}). \quad (6)$$

где a – коэффициент гидродинамического сопротивления груза.

Как в [3], считаем, что кинетическая энергия механической системы, складывается из кинетической энергии вращающегося барабана и поступательно (прямолинейно) движущегося груза (7):

$$T = J \frac{\dot{\psi}^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{G \cdot (1+k\lambda)}{g \cdot (1-\lambda)} (\dot{\psi} \cdot r_0 - \dot{X})^2. \quad (7)$$

где λ – отношение плотностей воды и груза, k

– коэффициент присоединенной массы груза,

g – ускорение свободного падения.

С помощью формализма Лагранжа была

получена система дифференциальных уравнений динамики механической системы

(8)-(11)

$$\ddot{\psi} + K_m \left(\ddot{\psi} - \frac{\ddot{X}}{r_0} \right) = \frac{1}{J} \sum M_0, \quad L = L_0 - r_0 \psi + X, \quad (8)$$

$$-K_m \frac{J}{r_0} \left(\ddot{\psi} - \frac{\ddot{X}}{r_0} \right) = \sum F, \quad K_m = \frac{G \cdot r_0^2 (1+k\lambda)}{g \cdot J \cdot (1-\lambda)}, \quad (9)$$

$$\sum M_0 = -B\dot{\psi} - (G + a \cdot |r_0 \dot{\psi} - \dot{X}| \cdot (r_0 \dot{\psi} - \dot{X})) \cdot r_0, \quad (10)$$

$$\sum F = G + a \cdot |r_0 \dot{\psi} - \dot{X}| \cdot (r_0 \dot{\psi} - \dot{X}) - \xi \left(\frac{X}{L} \right)^s. \quad (11)$$

3.2. Критерии подобия задачи

Введем безразмерные переменные (12):

$$\omega = \frac{\Omega}{\Omega_*} = \frac{\Omega B}{M_0}, \quad \tau = t \cdot \frac{B}{J}, \quad w = \frac{W}{\Omega_* r_0}, \quad x = \frac{X}{r_0},$$

$$\ell = \ell_0 - \psi + x. \quad (12)$$

Заметим, [3] в последней формуле (12) не учитывает слагаемое x – безразмерное растяжение. В расчетах синтетических канатов это может привести к заметной погрешности.

Используя (12), приведем систему уравнений к безразмерной нормализованной форме (13)-(15)

$$\frac{dw}{d\tau} = 1 - \omega + \gamma + \alpha |w - \omega| (\omega - w) - \beta \left(\frac{x}{\ell} \right)^s, \quad (13)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = 1 - \omega - K_y \left(\frac{x}{\ell} \right)^s, \quad \frac{d\psi}{d\tau} = \omega, \quad \frac{dx}{d\tau} = w; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{K_x}{K_m}, \quad \beta = K_y \frac{1 + K_m}{K_m}, \quad \gamma = \frac{K_g}{K_m}, \quad \ell_0 = \frac{L_0}{r_0}.$$

$$K_g = \frac{G \cdot r_0}{M_0}, \quad K_x = a \frac{M_0 r_0^3}{B^2}, \quad K_y = \frac{\Theta \cdot r_0}{M_0}.$$

Постановка задачи Коши включает систему дифференциальных уравнений (13)-(14) и начальные условия (15):

$$\omega(0) = 0, \quad \psi(0) = 0; \quad w(0) = 0, \quad x(0) = 0. \quad (15)$$

По (13)-(15) видно, что к критериями подобия задачи Коши, полученным в [3], $K_m, K_g, K_x, K_y, \ell_0$, следует добавить еще один – s , обусловленный нелинейностью характеристики нагрузка-удлинение синтетических канатов.

4. Результаты расчета

Поставленная задача (13)-(15) не имеет аналитического решения, Был использован численный метод в среде Mathcad. На рис. 2-6 представлены результаты расчета при следующем базовом наборе значений критериев подобия: $K_m=0,35$; $K_g=0,35$; $K_x=0,05$; $K_y=120$; $\ell_0=36$; $s = 0,175$. На рис. 2-3 показано, как изменение величины s влияет на решение. Наибольшее влияние s оказывает на относительное удлинение (16):

$$\xi = 100\% \cdot x / \ell = 100\% \cdot x / (\ell_0 - \psi + x). \quad (16)$$

Увеличение s приводит к росту относительного удлинения каната. Изменяются и кинематические характеристики механической системы, в частности, угловая скорость вращения

барабана дольше устанавливается (рис. 3). Но ее максимум увеличивается незначительно.

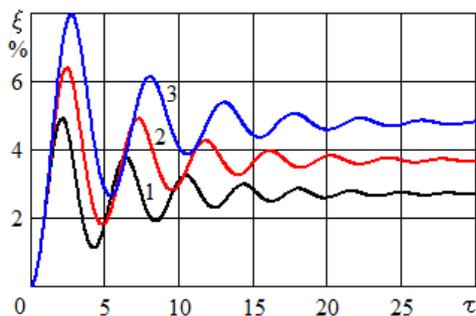


Рис. 2. Относительное удлинение каната: 1 – $s=1,6$; 2 – $s=1,75$; 3 – $s=1,9$

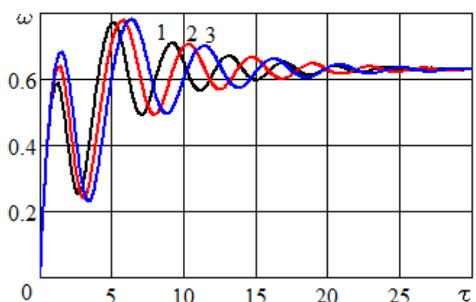


Рис. 3. Безразмерная угловая скорость барабана. Условия и обозначения, как на рис. 2

На рис. 4, 5 показано влияние значения критерия подобия K_y на динамику механической системы. K_y характеризует отношение сил упругости каната к окружному усилию лебедки. При увеличении K_y безразмерная сила упругости растет, и быстрее стремится к нулю.

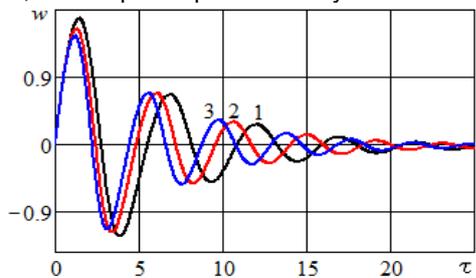


Рис. 4. Безразмерная скорость растяжения каната: 1 – $K_y=80$; 2 – $K_y=120$; 3 – $K_y=160$

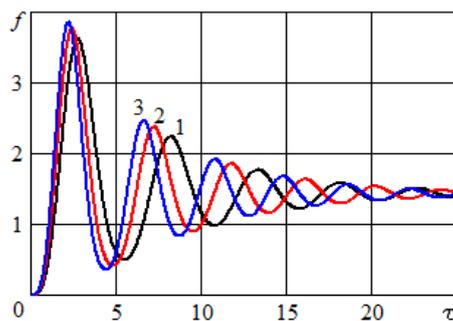


Рис. 5. Безразмерная сила упругости каната. Условия и обозначения, как на рис. 4

Заключение

Анализ результатов лабораторных испытаний позволил найти эмпирические параметры нелинейной характеристики нагрузка-удлинение канатов из полиамида, полистила, полипропилена. При этом степень нелинейности s зависит от материала и состояния каната. Для 3-прядных крученых канатов из исследованных материалов значение s составило от 1,67 до 1,83.

Получена безразмерная система уравнений динамики вертикального подъема груза из воды лебедкой с помощью синтетического каната. Установлено, что в рассматриваемой постановке задача динамики имеет 6 критериев подобия, в том числе относительную длину каната и показатель степени нелинейной характеристики s .

Задача решена численным методом. Исследовано влияние критериев подобия на динамику механической системы. Увеличение значения s наибольшее влияние оказывает на относительное удлинение каната, при этом угловая скорость вращения барабана дольше устанавливается

Для повышения достоверности математической модели необходимо продолжить исследование синтетических канатов в морской воде.

Литература

1. Калугин Е. А. Статические и динамические нагрузки в канатах подъемных лебедок при движении каната в вязкой среде. Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. Харьков: Украинская инженерно-педагогическая академия, 1995. 20 с.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Компьютерное моделирование процесса выборки орудия рыболовства с помощью барабана фрикционного типа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 5 (301). С. 53-57.
3. Ахмедов И.М. Динамика вертикального подъема груза из воды с учетом упругости троса // Водохозяйственные проблемы региона: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во КГТУ, 2016. С. 5-10.
4. 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.
5. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Синтетические и органические канаты в механизмах подъема // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 1. С. 26-29.

6. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Гидродинамическое сопротивление систем из стержней и нитей: монография. Калининград: Изд-во КГТУ, 2015. 192 с.

7. LANEX. Marine ropes - technical parameters [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lanex.cz/en/marine-ropes-technical-parameters> (дата обращения 02.01.2015).

References

1. Kalugin E.A. Sticheskie i dinamicheskie nagruzki v kanatakh pod'emnykh lebedok pri dvizhenii kanata v vyazkoy srede [Static and dynamic load in ropes of hoisting winches during movement of the rope in a viscous medium]. Thesis Candidate of Technical Sciences. Kharkov: Ukrainian engineering-pedagogical Academy, 1995. 20 p.

2. Nedostup A.A., Razhev A.O. (2013) Komp'yuternoe modelirovanie protsessa vyborki orudiya rybolovstva s pomo-shch'yu barabana friktsionnogo tipa [Computer simulation of the process sample fishing tools from the drum friction type] Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. No 5 (301), pp. 53-57.

3. Akhmedov I.M. (2016) Dinamika vertikal'nogo pod'ema gruza iz vody s uchetom uprugosti trosa [Dynamics of vertical cargo lift out of the water taking into account the elasticity of the rope] Vodokhozyaystvennyye problemy regiona: sbornik nauchnykh trudov. Kaliningrad: KGTU Puml., pp. 5-10.

4. 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.

5. Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V. (2017) Sinteticheskie i organicheskie kanaty v mekhanizмах pod'ema [Synthetic and organic rope in the lifting mechanism] Mekhanizatsiya stroitel'stva. V. 78, No 1, pp. 26-29.

6. Velikanov N.L., Naumov V.A. Gidrodinamicheskoe soprotivlenie sistem iz sterzhney i nitey [Hydrodynamic drag of the system of rods and strands]. Kaliningrad: KGTU Publ., 2015. 192 p.

7. LANEX. Marine ropes - technical parameters [Electronic resource]. URL: <http://www.lanex.cz/en/marine-ropes-technical-parameters> (application date 02.01.2015).

УДК 532.5.013.12:629.5

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОРМА ЦЕПИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕЧЕНИЯ И ВЕТРА НА СУДНО, СТОЯЩЕЕ НА ОДНОМ ЯКОРЕ

Владимир Аркадьевич Наумов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: van-old@mail.ru

Аннотация

До настоящего времени минимально необходимая длина цепи при стоянке судна на одном якоре оценивается по эмпирическим формулам, либо по модели цепной линии, лежащей в ДП. Показано, что плоская цепная линия получается только при коллинеарности направлений ветра и течения, в том числе, если хотя бы одна скорость равна нулю. Если ветер и течение действуют под иным углом, то цепь не будет лежать в ДП. Для танкера типа «Астрахань» рассчитаны углы дрейфа и ветра при стоянке судна на одном якоре. Определен критерий подобия такой задачи: произведение отношений плотностей, проекций площадей подводной и надводной частей судна на ДП, квадрата отношения скоростей. Найдены проекции силы лобового сопротивления и подъемной силы, действующей на якорную цепь, в пространственном случае. Указанные силы значительно отклоняются от осей координат. Получена безразмерная форма трехмерной краевой задачи равновесия якорной цепи. Критериями подобия являются: угол дрейфа Θ , отношение веса цепи в воде к силе гидродинамического сопротивления Φ , отношение коэффициентов гидродинамического сопротивления цепи при продольном и поперечном обтекании. Краевая задача решена численным методом в среде Mathcad. Чем меньше величина Φ , тем сильнее форма цепи будет отличаться от плоской линии.

Ключевые слова: якорная цепь, форма, ветер, течение, равновесие, краевая задача.

SPATIAL FORM OF THE CHAIN WHEN EXPOSED TO STREAM AND WIND ON THE SHIP RIDDEN AT SINGLE ANCHOR

Vladimir A. Naumov

professor, Dr.Sci.Tech., head of the water resources & water use department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: van-old@mail.ru

Abstract

Up to the present time the minimum required chain length during berthing of a vessel at single anchor rate-measurement is based on empirical formulas or model of a chain line lying in the centerline plane. The article shows that the flat catenary is obtained only when the collinear directions of wind and stream at least of one velocity is zero. If the wind and stream are at different angles, the chain will not lie in the centerline plane. Angles of drift and winds during berthing at single anchor are calculated for tanker type "Astrakhan". The similarity criterion of this problem is defined such as densities product of relations, projections of dead work and ship's bottom on the centerline plane, the square of speeds ratio. Projection forces of drag and lift force acting on the anchor chain in the spatial case are found. These forces significantly deviate from the coordinate axes. The non-dimensional form of three-dimensional boundary value problem of the anchor chain equilibrium is obtained. The similarity criteria are: drift angle Θ , the ratio of the weight of chain in water to the drag force Φ , the ratio of the coefficients of hydrodynamic drag chain for longitudinal and transverse flow. The boundary value problem is solved numerically in Mathcad. The smaller the value of Φ , the stronger form of chain will differ from a flat line.

Keywords: anchor chain, shape, wind, stream, equilibrium, boundary value problem.

Введение

Как известно, наибольшая сила сцепления якоря с грунтом при стоянке судна обеспечивается, когда его веретено занимает горизонтальное положение. Для этого должна быть достаточной длина вытравленной части

цепи L_k [1-2]. Имеются рекомендации по выбору величины L_k . При благоприятных условиях погоды (ветер силой до 4 баллов и незначительном течении) рекомендуется вытравливать якорную цепь на больших глубинах ($G > 50$ м) на длину равную не менее 2 глубин места якорной стоянки G ; на средних глубинах (30

м < $\Gamma \leq 50$ м) – $L_K = 3-4 \Gamma$; на малых глубинах ($\Gamma \leq 25-30$ м) – $L_K = 5-6 \Gamma$ (см., например, [3]).

В [3] приведены стандарты (1), рекомендуемые в Японии (для обычной якорной стоянки и при сильном ветре, соответственно):

$$L_{Я1} = 3 \cdot \Gamma + 90, \quad L_{Я2} = 4 \cdot \Gamma + 145, \quad (1)$$

и адмиралтейством Великобритании (2):

$$L_B = 4125 \cdot \Gamma^{0,5}. \quad (2)$$

Если предположить, что якорная цепь имеет форму цепной линии, то длина провисающей части, которую и принимают минимальную величину, можно рассчитать по формуле (3) [4]:

$$L = \sqrt{2 \cdot F_G \cdot H + H^2}, \quad F_G = k \cdot F / G, \quad (3)$$

где H – высота клюза над грунтом, м; k – коэффициент динамичности; F – величина главного вектора внешних сил, действующих на судно, Н; G – вес в воде цепи единичной длины, Н.

Заметим, $H = \Gamma + h_K$. Для определенности на рис. 1 принято $h_K = 2,5$ м. Видно, что $L_{Я1}$ (линия 1) близко к результату расчета по (3) при $F_G = 530$, а $L_{Я2}$ (линия 2) – при $F_G = 1150$, что соответствует увеличению внешних сил, действующих на судно, стоящее на якоре, более чем в 2 раза.

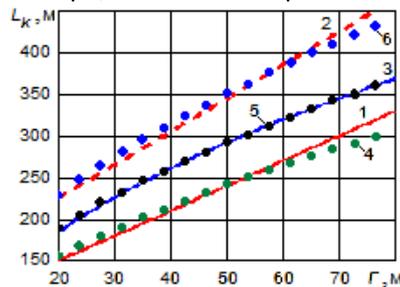


Рис. 1. Приближенный расчет минимальной длины якорной цепи: 1, 2 – по формулам (1); 3 – по (2); 4 – по (3) при $F_G = 530$; 5 – (3), $F_G = 790$; 6 – (3), $F_G = 1150$

Плоская цепная линия, строго говоря, получается при действии на якорной стоянке только одного фактора (ветра или течения), либо при совпадении (или противоположности) их направлений. Когда на судно действует и ветер, и течение (под разными углами, как на рис. 2), а на цепь, очевидно, только гидродинамические силы, линия O_1O не будет лежать в диаметральной плоскости судна (ДП). При этом минимальная длина цепи на стоянке будет больше, чем по формуле (3) и другим аналогичным формулам.

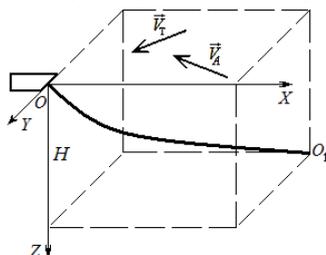


Рис. 2. Схема равновесия якорной цепи на стоянке судна при воздействии ветра и течения

1. Цель и задачи исследования

Цель статьи – разработка математической модели и метода расчета параметров трехмерной цепи под действием постоянного ветра и течения при стоянке судна на одном якоре. Задачи исследования:

- расчет угла дрейфа по заданному углу между векторами скоростей ветра и течения для покоящегося судна;
- математическая постановка трехмерной задачи равновесия цепи;
- решение численным методом краевой задачи равновесия якорной цепи.

Полагаем область гидродинамического сопротивления автотельной. Проблема рысканья судна при стоянке на якоре в данной статье не рассматривается.

2. Расчет углов ветра и дрейфа

Пусть заданы постоянные скорости ветра V_A , течения V_T и угол между ними ψ (рис. 2) Найдем угол дрейфа и угол ветра при стоянке судна на одном якоре.

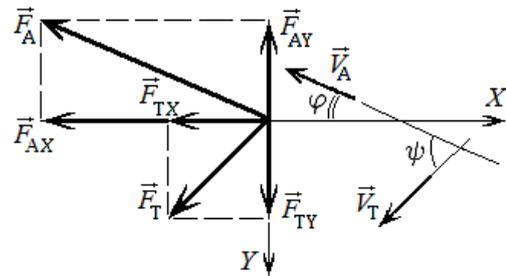


Рис. 2. Схема внешних сил, действующих на судно, стоящее на одном якоре

Так как рассматривается покоящееся судно, то внешние силы должны быть уравновешены; главный момент и главный вектор системы внешних сил равны нулю. Проекции сил на корабельные оси рассчитываются по формулам [5] (4)-(7):

$$F_{Tx} = 0,5 \cdot C_{Tx}(\theta) \cdot \rho \cdot S_{DP} \cdot V_T^2, \quad (4)$$

$$F_{Ty} = 0,5 \cdot C_{Ty}(\theta) \cdot \rho \cdot S_{DP} \cdot V_T^2, \quad (5)$$

$$F_{Ax} = 0,5 \cdot C_{Ax}(\varphi) \cdot \rho_A \cdot S_M \cdot V_A^2, \quad (6)$$

$$F_{Ay} = 0,5 \cdot C_{Ay}(\varphi) \cdot \rho_A \cdot S_A \cdot V_A^2, \quad (7)$$

где ρ – плотность воды; ρ_A – плотность атмосферного воздуха; θ – угол дрейфа; φ – угол ветра; S_{DP} – площадь погруженной части диаметрального батокса судна; S_A – площадь проекции надводной части корпуса судна на ДП; S_M – площадь проекции надводной части корпуса судна на плоскость мидель-шпангоута.

По рис. 2 $\theta = \psi - \varphi$. Из условия равновесия $F_{Ay} = F_{Ty}$, (5) и (7) получаем уравнение (8):

$$C_{Ty}(\psi - \varphi) \cdot \rho \cdot S_{DP} \cdot V_T^2 = C_{Ay}(\varphi) \cdot \rho_A \cdot S_A \cdot V_A^2. \quad (8)$$

Чтобы найти φ из (8), нужно задать зависимости от углов коэффициентов гидродинамического и аэродинамического сопротивления, которые определяются типом

судна. Для примера воспользуемся результатами (рис. 3, точки), полученными в [6] для танкера типа «Астрахань» с параметрами в грузу (осадка 9 м): $S_A = 1674 \text{ м}^2$; $S_M = 856 \text{ м}^2$; $S_{DP} = 1287 \text{ м}^2$.

Линии на рис. 3 были получены с помощью аппроксимирующих многочленов 9-го порядка, среднее квадратичное отклонение – менее 1 %. Аналогичные многочлены были получены для коэффициентов C_{Ax} , C_{Ay} . Рассматривались условия якорной стоянки при глубине 30 м и более, поэтому влияние мелководья не учитывалось.

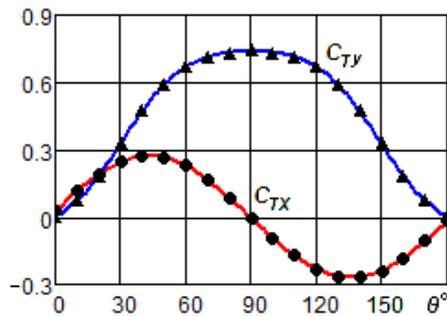


Рис. 3. Коэффициенты гидродинамического сопротивления танкера типа «Астрахань» [6]

Преобразуем уравнение (8) в форму (9):

$$C_{Ty}(\psi - \varphi) - \lambda \cdot C_{Ay}(\varphi) = 0, \quad (9)$$

$$\lambda = a \cdot (V_A / V_T)^2, \quad a = (\rho_A / \rho) \cdot (S_A / S_{DP})$$

В рассматриваемом примере $a = 0,00152$. Результаты решения уравнения (9) численным методом при трех значениях отношения скоростей показано на рис. 4.

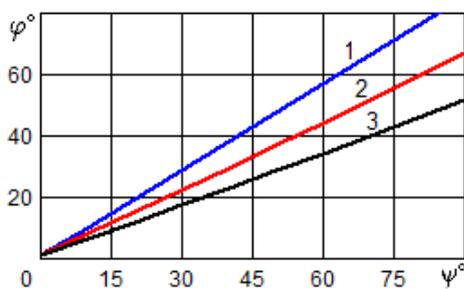


Рис. 4. Решение уравнения (9) для танкера типа «Астрахань»: 1 – $V_T/V_A = 3$; 2 – $V_T/V_A = 7$; 3 – $V_T/V_A = 10$

3. Математическая постановка задачи

3.1. Система дифференциальных уравнений

Используем векторную форму дифференциального уравнения равновесия нити (10):

$$d\vec{T} / dS + \vec{P} = 0 \quad (10)$$

где \vec{T} – сила натяжения нити, Н; \vec{P} – равнодействующая всех распределенных сил, отнесенных к единице длины нити и приложенных к текущей точке, Н/м; S – дуговая координата текущей точки нити (цепи), м.

Проецируя обе части векторного уравнения (10) на оси неподвижной декартовой системы координат с началом в точке O_1 , получим (11):

$$\frac{d}{dS} \left(T \frac{dX_1}{dS} \right) + R_x = 0, \quad \frac{d}{dS} \left(T \frac{dY_1}{dS} \right) + R_y = 0,$$

$$\frac{d}{dS} \left(T \frac{dZ_1}{dS} \right) + G - R_z = 0, \quad (11)$$

где R_x , R_y , R_z – проекции силы гидродинамического сопротивления цепи единичной длины на соответствующие оси.

В некоторой точке цепи проведем касательную. Проекции орта касательной определяются направляющими косинусами (12):

$$\frac{dX_1}{dS} = \cos \alpha, \quad \frac{dY_1}{dS} = \cos \beta, \quad \frac{dZ_1}{dS} = \cos \gamma, \quad (12)$$

где α , β , γ – углы между касательной в текущей точке и осями координат O_1X_1 , O_1Y_1 , O_1Z_1 .

Для замыкания системы уравнений (11)-(12) необходимо задать R_x , R_y , R_z .

3.2. Проекции силы гидродинамического сопротивления цепи на оси координат

Силу гидродинамического сопротивления, действующую на цепь, как на всякую гибкую связь [9], разложим на две составляющие: лобовую силу и подъемную (боковой силой, в отличие от троса, можно пренебречь). Величины сил на единицу длины вычисляем по формулам (13):

$$R_{\Gamma} = 0,5 \cdot C_{\Gamma} \cdot \rho \cdot d \cdot V_T^2, \quad R_{\Gamma} = 0,5 \cdot C_{\Gamma} \cdot \rho \cdot d \cdot V_T^2. \quad (13)$$

где d – эквивалентный диаметр цепи.

Воспользуемся для расчета локального коэффициентов гидродинамического сопротивления цепи известными формулами [7], лобового сопротивления (14), подъемной силы (15):

$$C_{\Gamma} = C_0 + (C_{90} - C_0) \cdot (\sin \alpha_0)^{2,7}, \quad (14)$$

$$C_{\Gamma} = C_{90} \cdot \sin^2 \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0, \quad (15)$$

где α_0 – угол атаки; C_0 , C_{90} – коэффициенты сопротивления цепи при продольном ($\alpha_0 = 0$) и поперечном ($\alpha_0 = 90^\circ$) обтекании, соответственно.

Заметим, что в отличие от канатов и тросов, гидродинамическое сопротивление цепей изучено слабо и нуждается в дальнейшем экспериментальном исследовании.

Для решения трехмерной краевой задачи воспользуемся методом [8] с модификацией, которая необходима для учета заметного отклонения лобовой и подъемной сил от плоскости XOZ .

Лобовая сила направлена по вектору скорости потока, в нашем случае V_T , а подъемная сила – перпендикулярно к нему. Проекции первой силы на оси координат (16) найдем по углу Θ :

$$R_{\Gamma x} = R_{\Gamma} \cdot \cos \Theta, \quad R_{\Gamma y} = R_{\Gamma} \cdot \sin \Theta, \quad R_{\Gamma z} = 0. \quad (16)$$

Найдем орт нормали в текущей точке цепи $\vec{n} = (n_x; n_y; n_z)$. Из двух уравнений (17) получим формулы (18):

$$n_x \cdot \cos \Theta + n_y \cdot \sin \Theta = 0, \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1; \quad (17)$$

$$n_x = -n_y \cdot \text{tg} \Theta, \quad n_z = \sqrt{1 - (n_y / \cos \Theta)^2}. \quad (18)$$

Далее используем условие, что \vec{n} должен лежать в плоскости, проведенной через вектор скорости течения и касательную к цепи с направляющими косинусами $(\cos\alpha; \cos\beta; \cos\gamma)$. Смешанное произведение этих трех векторов должно равняться нулю (19):

$$\begin{vmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta & 0 \\ n_x & n_y & n_z \\ \cos\alpha & \cos\beta & \cos\gamma \end{vmatrix} = 0. \quad (19)$$

Из (18)-(19) следует (20)-(21)

$$n_x = -B \cdot \sin\Theta / N, \quad n_y = B \cdot \cos\Theta / N, \quad (20)$$

$$n_z = A / N, \quad N = \sqrt{A^2 + B^2}; \quad (21)$$

$$A = \cos\gamma \cdot (\sin^2\Theta - \cos^2\Theta), \\ B = \cos\alpha \cdot \sin\Theta - \cos\beta \cdot \cos\Theta.$$

3.3. Граничные условия

Постановка краевой задачи равновесия включает систему дифференциальных уравнений (11)-(12) и граничные условия (22)-(23):

- в точке $O_1 (S=L)$ $X_1 = 0, Y_1 = 0, Z_1 = 0;$ (22)

- в точке $O (S=0)$ $T_x = F, T_y = 0, Z_1 = H;$ (23)

Величина главного вектора F (24) рассчитывается по формулам (4), (6):

$$F = F_{Tx} + F_{Ax} = \\ = 0,5C_{Tx}(\theta) \cdot \rho \cdot S_{DP} V_T^2 + 0,5C_{Ax}(\varphi) \cdot \rho_A \cdot S_M V_A^2. \quad (24)$$

4. Решение краевой задачи

4.1. Безразмерная форма уравнений

Введем безразмерные переменные (25):

$$\tau = \frac{T}{K}, \quad \sigma = \frac{S}{L}, \quad x = \frac{X_1}{L}, \quad y = \frac{Y_1}{L}, \quad z = \frac{Z_1}{L}; \quad (25)$$

$$\bar{y} = Y/H, \quad \bar{z} = Z/H, \quad K = 0,5 \cdot C_{90} \cdot \rho \cdot L \cdot d \cdot V_T^2,$$

где K – сила, действующая на прямую цепь длиной L при поперечном обтекании.

Подставив (16), (20), (21), (25) в (11), получим (26)-(28):

$$\frac{d}{d\sigma} \left(\tau \frac{dx}{d\sigma} \right) = cl \cdot \cos\Theta - cp \cdot n_x, \quad cl = \frac{C_l}{C_{90}}, \quad (26)$$

$$\frac{d}{d\sigma} \left(\tau \frac{dy}{d\sigma} \right) = cl \cdot \sin\Theta + cp \cdot n_y, \quad cp = \frac{C_p}{C_{90}}, \quad (27)$$

$$\frac{d}{d\sigma} \left(\tau \frac{dz}{d\sigma} \right) = \Phi + cp \cdot n_z, \quad \Phi = \frac{G \cdot L}{K}, \quad (28)$$

где Φ – критерий подобия, характеризующий отношение веса цепи в воде и сил гидродинамического сопротивления.

4.2. Нормализованная форма уравнений

Для решения краевой задачи, как в [8], введем вспомогательные функции (29):

$$p(\sigma) = \tau \cdot \frac{dx}{d\sigma}, \quad q(\sigma) = \tau \cdot \frac{dy}{d\sigma}, \quad r(\sigma) = \tau \cdot \frac{dz}{d\sigma}. \quad (29)$$

Функции (29) позволяют привести дифференциальные уравнения к нормализованной форме (30)-(33):

$$\frac{dp}{d\sigma} = cl \cdot \cos\Theta - cp \cdot n_x, \quad \frac{dx}{d\sigma} = -\cos\alpha(\sigma), \quad (30)$$

$$\frac{dq}{d\sigma} = cl \cdot \sin\Theta + cp \cdot n_y, \quad \frac{dy}{d\sigma} = -\cos\beta(\sigma), \quad (31)$$

$$\frac{dr}{d\sigma} = \Phi + cp \cdot n_z, \quad \frac{dz}{d\sigma} = -\cos\beta(\sigma). \quad (32)$$

Знак минус в правых частях (30)-(32) обусловлен противоположным направлением отсчета координат x, y, z и σ .

Безразмерные граничные условия (33)-(34):

$$x(1) = 0, \quad y(1) = 0, \quad z(1) = 0; \quad (33)$$

$$p(0) = p_0, \quad q(0) = 0, \quad r(0) = r_0. \quad (34)$$

Замыкающие соотношения (35)-(36):

$$\tau(\sigma) = \sqrt{(p(\sigma))^2 + (q(\sigma))^2 + (r(\sigma))^2}, \quad (35)$$

$$\cos\alpha = \frac{p(\sigma)}{\tau(\sigma)}, \quad \cos\beta = \frac{q(\sigma)}{\tau(\sigma)}, \quad \cos\gamma = \frac{r(\sigma)}{\tau(\sigma)}. \quad (36)$$

4.3. Результаты расчета

Краевая задача (30)-(34) решалась численным методом в среде Mathcad. На рис. 5-6 представлены результаты расчета при $\Phi=0,3; \Theta=30^\circ$. Видно, что при указанных значениях параметров отклонение цепи по оси Y меньше глубины, сравнимо с отклонением по X . Значит, представление цепи плоской линией может привести к большой погрешности.

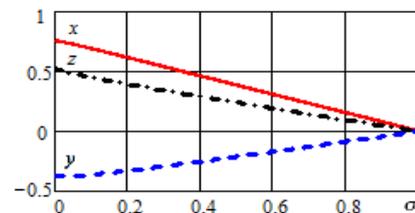


Рис. 5. Изменение безразмерных координат цепи

На рис. 7 показано изменение формы цепи при увеличении Φ , что равносильно уменьшению скорости течения при прочих неизменных условиях. Чем больше V_T , тем сильнее форма цепи будет отличаться от плоской линии.

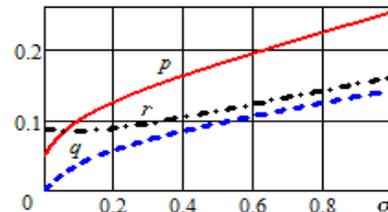


Рис. 6. Изменение вспомогательных функций

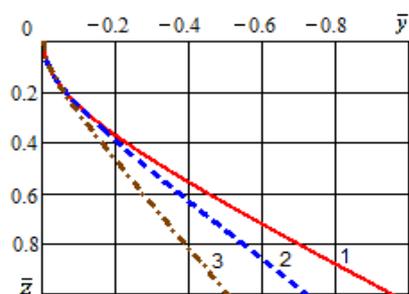


Рис. 7. Проекция формы цепи на плоскость мидель-шпангоута: 1 – $\Phi = 0,2$; 2 – $\Phi = 0,3$; 3 – $\Phi = 0,4$

Заключение

При стоянке судна на одном якоре модель плоской цепной линии, лежащей в ДП, пригодна только при коллинеарности направлений ветра и течения, в том числе, если хотя бы одна скорость равна нулю. Для танкера типа «Астрахань»

рассчитаны углы дрейфа и ветра. Определен критерий подобия такой задачи, прямо пропорциональный квадрату отношения скоростей ветра и течения.

Получена безразмерная форма трехмерной краевой задачи равновесия якорной цепи. Критериями подобия являются: угол дрейфа Θ , отношение веса цепи в воде к силе гидродинамического сопротивления Φ , отношение коэффициентов гидродинамического сопротивления цепи при продольном и поперечном обтекании. Краевая задача решена численным методом в среде Mathcad. Чем меньше величина Φ , тем сильнее форма цепи будет отличаться от плоской линии.

Для повышения достоверности математической модели необходимо продолжить исследование гидродинамического сопротивления цепей.

Литература

1. Иванов В.В. Усилия, действующие на объект швартовки, со стороны одиночной якорной связи // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 4. С.724-727.
2. Yabuki H., Takemoto T., Yamashita K., Saitoh S. On the development of an anchor watch supporting system for small merchant ships. Int. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2012. V. 6, No 3. P. 331-335.
3. Шарлай Г.Н. Маневрирование и управление морским судном. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2015. 572 с.
4. Алексеев Л.Л. Практическое пособие по управлению морским судном. СПб: ЗАО ЦНИИМФ, 2003. 192 с.
5. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я. И. Войткунского. Ленинград: Судостроение, 1985. 768 с.
6. Иванов В.В. Разработка безопасных способов маневрирования при выполнении швартовых операций к судну, стоящему на якоре. Дисс. ... канд. техн. наук. Мурманск: МГТУ, 2014. 173 с.
7. Наумов В.А. Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3(37), Т.1. С. 158-162.
8. Наумов В.А., Ахмедов И.М. Численный метод решения трехмерной задачи равновесия сферического тела на тросе в потоке // Известия КГТУ. 2015. № 37. С. 63-72.

References

1. Ivanov V.V. (2011) Usiliya, deystvuyushchie na ob"ekt shvartovki, so storony odinochnoy yakornoj svyazi [Forces acting on the object mooring, by a single anchor connection]. Vestnik MGTU. V. 14, No 4, pp.724-727.
2. Yabuki H., Takemoto T., Yamashita K., Saitoh S. (2012) On the development of an anchor watch supporting system for small merchant ships. Int. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. V. 6, No 3. P. 331-335.
3. Sharlay G.N. Manevrirovaniye i upravleniye morskim sudnom [Maneuvering and control of marine vessel]. Vladivostok: Mor. State Univ, 2015. 572 p.
4. Alekseev L.L. Prakticheskoye posobie po upravleniyu morskim sudnom [Practical guide to the management of marine vessel]. SPb: ZAO CNIIMF, 2003. 192 p.
5. Spravochnik po teorii korablya. T. 1. Gidromekhanika. Soprotivleniye dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli [Handbook of the ship theory. V. 1. Fluid mechanics. The drag to motion of ships. Marine propulsion], Edit. Ya.I. Voytkunsky. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.
6. Ivanov V.V. Razrabotka bezopasnykh sposobov manevrirovaniya pri vypolnenii shvartovykh operatsiy k sudnu, stoyashchemu na yakore [Development of safe ways of maneuvering when performing mooring operations, to the vessel standing at anchor]. Thesis Candidate of Technical Sciences. Murmansk: MGTU, 2014. 173 p.
7. Naumov V.A. (2017) Sily gidrodinamicheskogo soprotivleniya gibkikh svyazey buksiruemykh podvodnykh ob"ektov [Hydrodynamic drag force of flexible cables of towed underwater objects]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. No 3(37), V.1, pp. 158-162.
8. Naumov V.A., Akhmedov I.M. (2015) Chislennyy metod resheniya trekhmernoy zadachi ravnesiya sfericheskogo tela na trose v potoke [Numerical method for solving three-dimensional problem of equilibrium of a spherical body on a rope in the stream]. Izvestiya KGTU. No 37, pp. 63-72.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 537.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНВЕРСИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В РЕЛАКСОМЕТРИИ ЯМР ПОЛИМЕРОВ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**Николай Яковлевич Синявский**

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики и химии
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Ирина Павловна Корнева

кандидат технических наук, профессор
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: ikorneva05@rambler.ru

Аннотация

Целью настоящей работы являлось исследование свойств обратных интегральных преобразований релаксационных сигналов магнитного резонанса для идентификации и контроля качества веществ, создание алгоритма инверсии для совокупности двух различных интегральных преобразований, моделирующих быстрый и медленный механизмы релаксации.

Для решения проблемы двухкомпонентности на основе алгоритма RILT разработан алгоритм обобщенной инверсии для одновременного нахождения гауссовских и экспоненциальных спадов. За основу при разработке 1М – инверсии принят алгоритм регуляризованной инверсии преобразования Лапласа (RILT).

В качестве методов исследования использовались релаксометрия ЯМР протонов в слабом магнитном поле, импульсная последовательность Карра-Парцелла-Мейбума-Джилла (CPMG) для измерения распределений T_2 и инверсия комбинации интегральных преобразований для разделения вкладов гауссовых и экспоненциальных составляющих.

Описанный алгоритм инверсии был применен к ряду модельных и экспериментальных данных ЯМР – поперечной релаксометрии низкого поля на образцах полимеров и нефтепродуктов. Результаты сравнивались со стандартными методами обработки. Разработанный подход показал хорошие результаты на твердых полимерах.

Предлагаемый метод инверсии применим в широком спектре областей, в геологических образцах, пищевых продуктах и т.д. Многие разнообразные материалы, содержат гетерогенные смеси твердых и жидких компонентов, которые могут давать комбинированную гауссовскую и экспоненциальную релаксацию. Метод может быть адаптирован также для двумерных данных, таких как T_1 - T_2 или T_2 -диффузионные корреляции.

Ключевые слова: судовые полимерные материалы, контроль качества, ЯМР релаксометрия

STUDY OF POSSIBILITY OF INTEGRAL TRANSFORMS INVERSION IN NMR RELAXOMETRY OF SHIPBOARD EQUIPMENT POLYMERS**Nikolay Y. Sinyavsky**

Dr.Sci.Tech., professor, department of physics and chemistry
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Irina P. Korneva

PhD, professor, department of physics and chemistry
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: ikorneva05@rambler.ru

Abstract

The purpose of this work is to study the properties of inverse integral transformations of relaxation magnetic resonance signals for the identification and quality control of substances, the creation of an inversion algorithm for a set of two different integral transformations simulating fast and slow relaxation mechanisms.

To solve the two-component problem, a generalized inversion algorithm is developed to simultaneously find Gaussian and exponential decays based on the RILT algorithm. As a basis for the development of 1M-inversion, the algorithm of regularized inversion of the Laplace transform (RILT) is adopted.

Relaxometry of proton NMR in a weak magnetic field, the Carr-Parcell-Meibum-Gill impulse sequence (CPMG) for measuring T_2 distributions and inversion of a combination of integral transformations to separate the contributions of Gaussian and exponential components were used as research methods.

The described inversion algorithm was applied to a number of model and experimental NMR data - transverse relaxation of low field on samples of polymers and petroleum products. The results were compared with standard treatment methods. The developed approach showed good results on solid polymers.

The proposed inversion method is applicable in a wide range of areas, in geological samples, food products, etc. Many diverse materials contain heterogeneous mixtures of solid and liquid components that can give combined Gaussian and exponential relaxation. The method can also be adapted for 2D data, such as T_1 - T_2 or T_2 -diffusion correlations.

Keywords: ship polymer materials, quality control, NMR relaxometry

Введение

Проблема контроля качества судовых полимеров представляет собой важную задачу, так как от этого зависит сохранность эксплуатируемой техники и безопасности в морской индустрии. Существующие в настоящее время методы контроля или не обеспечивают однозначной идентификации качества полимеров, или являются сложными и дорогостоящими. Разработка новых экспресс-методов контроля качества и обнаружения деструкции и нарушения эксплуатационных характеристик с помощью компактных приборов представляет собой актуальную задачу.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) является одним из наиболее важных аналитических инструментов для анализа веществ. ЯМР с компактными магнитами и достаточно однородными полями в последнее время начали широко использовать для тестирования материалов. ЯМР релаксометрия может быть использована для неразрушающего контроля материалов с помощью датчиков типа NMR-Mouse, разработанных в группе профессора Б. Блюмиха.

Поскольку измерение скорости поперечной релаксации с помощью импульсной последовательности CPMG является надежным и быстрым, это основной метод в ЯМР при оценке свойств материалов. При этом из-за низкой напряженности поля релаксометров ЯМР - измерения ведутся почти всегда на ядрах водорода. Полимерные материалы могут содержать водород в аморфных и кристаллических компонентах. Следовательно, результирующий сигнал больше не может считаться возникающим исключительно от одной фазы материала. Аморфные и кристаллические фазы имеют скорости релаксации, зависящие от внутренних взаимодействий их молекул.

Данные измерений представляют собой сумму всех релаксационных компонент в системе. Для интерпретации результатов обычно к спаду сигнала применяется обратное преобразование Лапласа, чтобы получить распределение характерных времен релаксации, которое будет отражать распределение аморфных и кристаллических зон в образце. В то время как спады сигналов от жидких и аморфных областей хорошо описываются с использованием экспоненциальной функции спада, закристаллизованные участки полимеров могут иметь спад по гауссовским или экспоненциальным функциям, в зависимости от режима движения молекул. Поэтому измеренная релаксация может быть комбинацией гауссовских и экспоненциальных спадов.

Попытки инверсии гауссовских спадов с использованием экспонент приводят к значительному искажению сигналов и времен релаксации, могут также приводить к физически нереалистичным результатам: пики могут появляться во время значительно меньшее интервала между эхами CPMG. Однако анализ результатов с помощью релаксации ЯМР с использованием стандартного обратного преобразования Лапласа по-прежнему является нормой из-за отсутствия альтернативных методов инверсии, не приводящих к добавлению к результатам артефактов, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы являлось исследование свойств обратных интегральных преобразований релаксационных сигналов магнитного резонанса для идентификации и контроля качества веществ, создание алгоритма инверсии для совокупности двух различных интегральных преобразований, моделирующих быстрый и медленный механизмы релаксации.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Спектры ЯМР высокого разрешения протонов получены с помощью спектрометра Varian 400 и программного обеспечения SpinWorks в лаборатории магнитного резонанса БФУ им. И. Канта. Релаксационные эксперименты ЯМР протонов на частоте 13.65 МГц выполнены в слабом магнитном поле с помощью спектрометра Testag Apollo с программным обеспечением TNMR. Применялся постоянный магнит с размерами рабочей области образца: диаметр – 5 мм, длина – 20 мм. Для измерения времени спин-спиновой релаксации T_2 использовалась последовательность CPMG.

В качестве образцов при исследованиях были использованы следующие полимеры: судовое маловязкое топливо (СМТ) и поливинилхлорид (ПВХ).

В полимерах с двухфазным состоянием существенное содержание водорода может быть

связано с обеими фазами и давать вклады в сигнал ЯМР. Если метод анализа результатов релаксометрии ЯМР в виде разложения по экспонентам применять к данным, содержащим гауссовские спады, это может привести к физически нереалистичным распределениям времен релаксации, например, к слишком коротким временам релаксации, которые, невозможно определить с помощью применяемых настроек релаксометра. Необходим одновременный гауссово-экспоненциальный метод инверсии интегральных преобразований для образцов, где релаксация состоит как из гауссовского, так и экспоненциального спадов.

3. Результаты исследований и их анализ

Спектры ЯМР высокого разрешения протонов для СМТ и других нефтепродуктов качественно подобны и для определения

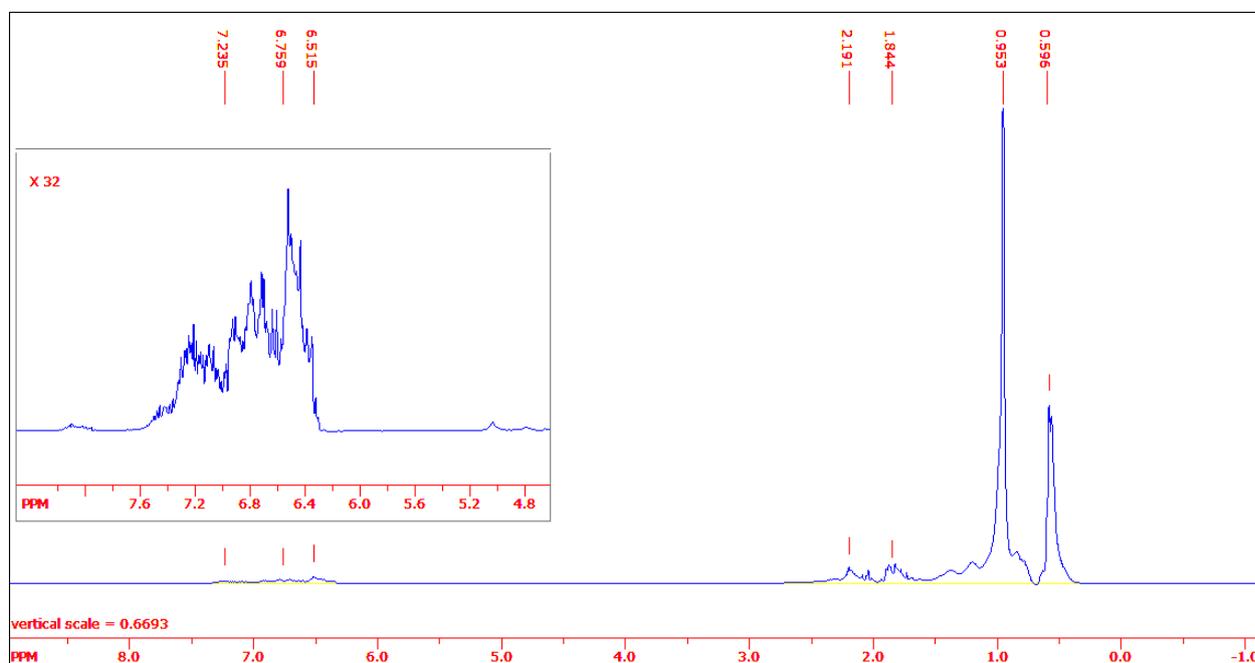


Рис. 1. Спектр ЯМР ^1H высокого разрешения судового маловязкого топлива.

количественного состава парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов в образцах необходимо интегрирование спектра в соответствующих его областях. Рис. 1 иллюстрирует спектр ЯМР ^1H в высоком поле для СМТ. Получение таких спектров требует сложного и дорогостоящего оборудования и больших затрат времени на анализ результатов. Вместе с тем, в работах [1,2] было показано, что для анализа качества материалов может с успехом использоваться ЯМР релаксометрия в низком поле. T_2 – релаксометрия является одним из способов количественной оценки фазового состава многофазных полимеров. Это непростая задача из-за сложности многофазной композиции

и сложности молекулярных движений. T_2 релаксация сигнала от жесткой фазы полимера обычно описывается функцией Абрагама,

$$I(t) = I(0) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_2} \right)^2 \right] \frac{\sin(at)}{at}, \quad (1)$$

где a - определяется вторым и четвертым моментами Вен Флека, или гауссовой функцией

$$I(t) = I(0) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_2} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

от полужесткой фазы – функцией Вейбулла

$$I(t) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{t}{T_2} \right)^n \right], \quad (3)$$

где n - лежит в пределах от 1 до 2; и от мягкой аморфной фазы – экспоненциальной функцией

$$I(t) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{t}{T_2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

[3].

СМТ жидкость и распределение времен релаксации хорошо описывается разложением по экспонентам [2]. ПВХ - это частично кристаллический полимер, в котором следует ожидать присутствие компонент с коротким временем релаксации и компонент от аморфных областей с длинными временами релаксации. Первые описываются спадами, близкими к гауссовым, а вторые – к экспоненциальным. Соотношение долей сигнала ЯМР, относимых к указанным компонентам зависит от температуры образца, от степени деструкции материала.

Для решения проблемы двухкомпонентности мы на основе алгоритма RILT [4] разработали обобщенную инверсию для одновременного нахождения гауссовских и экспоненциальных спадов. Измеренный сигнал мы представляли формулой:

$$S(t) = \sum_i \left[A_i e^{-0.5(t/T_{2i})^2} + B_i e^{-t/T_{2i}} \right] + \varepsilon(t) \quad (5)$$

где A_i - интенсивность гауссовой компоненты T_{2i} , B_i - интенсивность экспоненциальной компоненты T_{2i} , $\varepsilon(t)$ – вклад шума. Это отличается от стандартных методов обратного преобразования Лапласа, используемых для анализа данных СРМГ. Предыдущие инверсии, описанные в литературе, требовали априорного знания о количестве компонентов, которые должны быть установлены, или предположения, что все при малых временах релаксации принадлежит гауссовским компонентам, а при более длинных временах - к экспоненциальным компонентам. Поскольку гауссовский сигнал с большей вероятностью проявляется при более коротких временах T_2 , чем экспоненциальный сигнал, в работе [5] для инверсии применяется сигмоидная функция для выбора решений. Однако, как гауссовские, так и экспоненциальные сигналы спада могут присутствовать при тех же коротких временах релаксации, с возможностью их взаимного перекрытия.

Упрощенная блок-схема алгоритма программы показана на рис. 2. Программа RILT [4] модифицирована для произвольного регуляризованного обратного интегрального преобразования.

В основе алгоритма лежит функция `fminsearch` пакета `MatLab`, которая находит минимум скалярной функции нескольких переменных, начиная с начальной оценки g_0 . Массив распределений времен релаксации $g(s)$, обратное интегральное преобразование массива экспериментальных данных $y(t)$, вычисляется

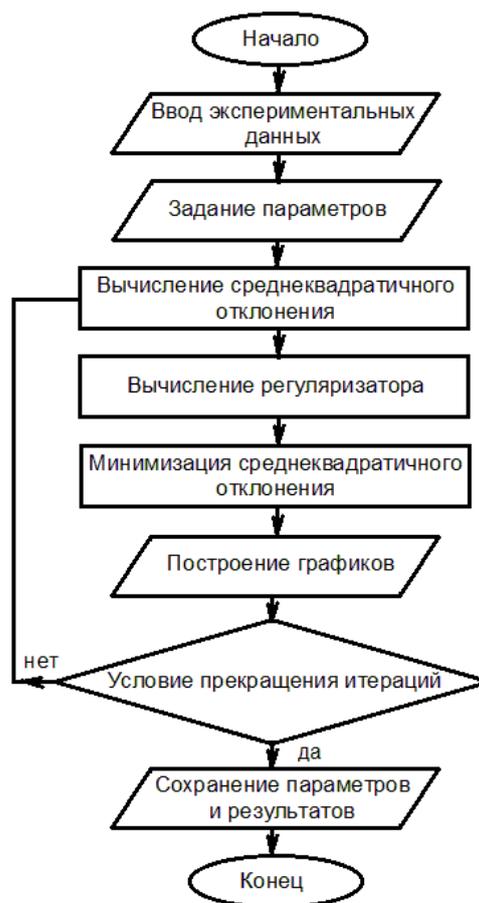


Рис 2. Упрощенная блок-схема алгоритма инверсии интегрального преобразования.

методом регуляризованных наименьших квадратов. g_0 – исходное начальное распределение времен релаксации, определенное пользователем. y_{fit} - это интегральное преобразование, аппроксимирующее величину y с распределением g , определяемом на каждом этапе расчета. Величина $alpha$ – задаваемый параметр регуляризации. Важным в работе алгоритма является правильный выбор весового множителя между вкладом гауссовой и экспоненциальной составляющей.

Результаты тестирования традиционных методов инверсии интегрального преобразования и гауссово-экспоненциальный метод инверсии показаны на рис. 3. Кривые $a-d$ – результат применения традиционных методов инверсии при разложении по функциям Гаусса и экспоненциальным функциям. Гауссовы пики на рисунке обозначены буквой G , экспоненциальные – E . Времена поперечной релаксации для гауссовой компоненты $T_2 = 0.2$ мс, для экспоненциальной – $T_2 = 2.0$ мс. Амплитуды обеих моделируемых компонент равны единице. Рис. 3а иллюстрирует отсутствие искажений при использовании разложения по экспонентам, когда обе составляющие экспоненциальны. Искажений в распределении нет и для случая, когда обе компоненты гауссовы, и применяется разложение

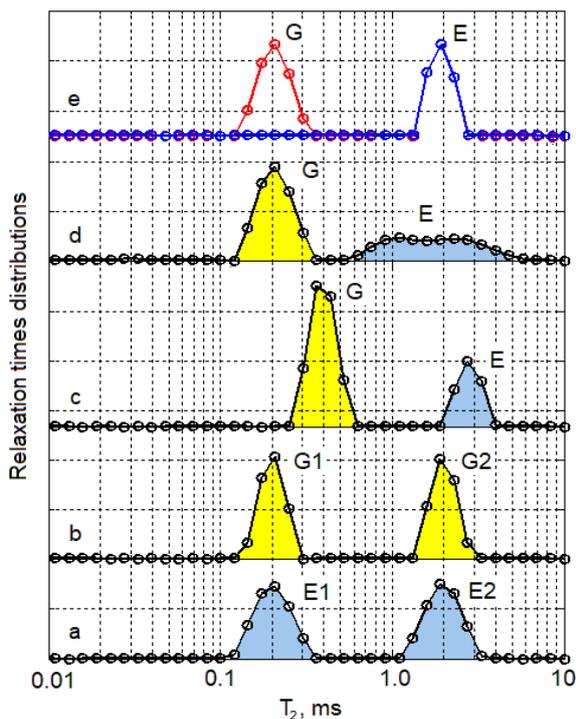


Рис. 3. Результаты инверсии интегральных преобразований экспоненциальных и гауссовых спадов.

по гауссовым функциям (рис. 3b). Однако, если компоненты комбинированы, то применение разложения по экспонентам (рис. 3c) и разложения по функциям Гаусса (рис. 3d) приводит к искажениям в распределении времен релаксации: сдвигу пиков, появлению новых линий. Возможности нового метода инверсии комбинированных интегральных преобразований иллюстрирует рис. 3e. Здесь искажения и артефакты отсутствуют.

Работу метода с экспериментальными данными иллюстрирует рис. 4. Применение нового метода инверсии позволяет не только получить корректное распределение, но и разделить вклады гауссовой и экспоненциальной составляющих (рис.4c).

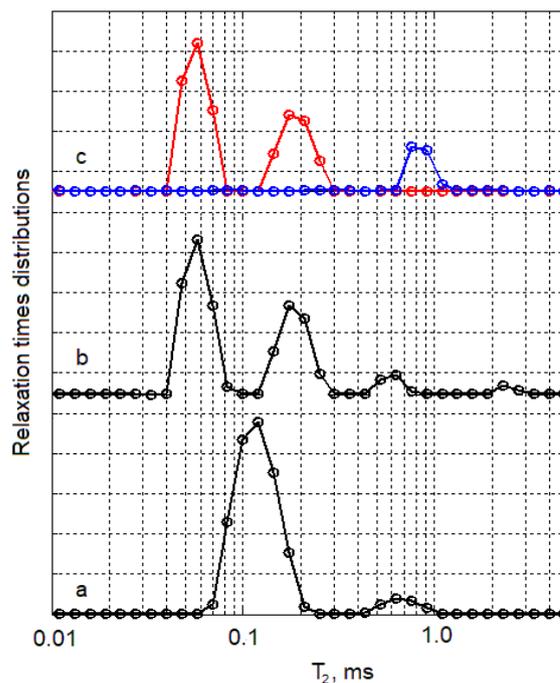


Рис. 4. Распределение времен релаксации T_2 в ПВХ: разложение по экспонентам (a), по функциям Гаусса (b) и одновременно по экспонентам и функциям Гаусса (c).

Заключение

Таким образом, в работе для корректного анализа измерений поперечной релаксации ЯМР в полимерах была разработана одновременная гауссово-экспоненциальная инверсия и проведено предварительное тестирование метода с использованием смоделированных данных и измерений на образце ПВХ. Комбинация гауссовских и экспоненциальных спадов приводит к более реалистичным результатам для полимеров, содержащих области кристаллизации, по сравнению с широко используемой инверсией преобразования Лапласа.

Метод инверсии, применяемый в данной работе, может быть полезен для анализа данных и из других областей, где происходит комбинированный гауссовский и экспоненциальный релаксационный спад. Поскольку комбинированная инверсия имеет больше параметров, которые необходимо включать в процесс инверсии, следует проявлять осторожность, чтобы результаты инверсии имели физический смысл для решаемой задачи.

Благодарности. Авторы благодарят Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР AAA-A17-117041810027-8).

Литература

1. Bogaychuk A.V., Sinyavsky N.Ya., & Kupriyanova G.S. (2016). Investigation of polymer degradation using NMR relaxometry with inverse Laplace transformation. Applied Magnetic Resonance, 47(12), 1409–1417.

2. Синявский Н.Я., Мершиев И.Г. (2017) Исследование судовых горюче-смазочных материалов с помощью ЯМР релаксометрии с целью контроля качества. Морские интеллектуальные технологии, №3 (37) Т.1, 62-66.
3. Adams A. (2016). Analysis of solid technical polymers by compact NMR. Trends in Analytical Chemistry, 83, 107–119.
4. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Электронный ресурс].
5. Washburn K. E., Anderssen E., Vogt S. J., Seymour J. D., Birdwell J. E., Kirkland C. M., Codd S. L. (2015). Simultaneous Gaussian and exponential inversion for improved analysis of shales by NMR relaxometry. Journal of Magnetic Resonance, 250, 7–16.

References

1. Bogaychuk A.V., Sinyavsky N.Ya., & Kupriyanova G.S. (2016). Investigation of polymer degradation using NMR relaxometry with inverse Laplace transformation. Applied Magnetic Resonance, 47(12), 1409–1417.
2. Sinyavsky N.Ya., Mershev I.G. (2017) Study of marine fuels and lubricants using NMR relaxometry for the purpose of quality control. Marine intelligent technologies, №3 (37) Т.1, 62-66.
3. Adams A. (2016). Analysis of solid technical polymers by compact NMR. Trends in Analytical Chemistry, 83, 107–119.
4. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> Electronic resource
5. Washburn K. E., Anderssen E., Vogt S. J., Seymour J. D., Birdwell J. E., Kirkland C. M., Codd S. L. (2015). Simultaneous Gaussian and exponential inversion for improved analysis of shales by NMR relaxometry. Journal of Magnetic Resonance, 250, 7–16.

УДК 532.5.13, 539.3, 519.61, 639.2.081.117.21

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЯВНЫХ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТРАЛОВЫХ СИСТЕМ

Александр Алексеевич Недоступ

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев

соискатель кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Аннотация

При моделировании с использованием систем дифференциальных уравнений одной из задач является выбор конечно-разностной схемы. Основными из критериев выбора является точность, скорость сходимости и устойчивость. неявные конечно-разностные схемы отличаются большей точностью, более быстрой сходимостью и устойчивостью по сравнению с явными. Проблема устойчивости особенно важна при решении жестких систем дифференциальных уравнений, таких как уравнения движения с учетом сил натяжения, когда при переходных процессах возможно скачкообразное многократное изменение величины сил натяжения. В статье рассмотрено решение задачи моделирования динамики траловой системы, основанной на математической модели взаимодействующих частиц, неявным конечно-разностным методом Эйлера. Получены зависимости внутренних сил от перемещения узлов и их частные производные по скорости и перемещению и зависимости гидродинамических сил от скорости. Предложены методы расчета частных производных гидродинамических сил по скорости и перемещению, линеаризации систем дифференциальных уравнений движения и решения полученной системы линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: трал, гидродинамика, дискретная математическая модель, взаимодействующие частицы, неявные конечно-разностные схемы, метод Эйлера.

APPLICATION OF IMPLICIT FINITE-DIFFERENCE SCHEMES FOR MODELING OF THE TRAWL SYSTEMS DYNAMICS

Alexander A. Nedostup

PhD, associate professor of the industrial fisheries department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey O. Razhev

research scholar of the industrial fisheries department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: progacpp@live.ru

Abstract

When modeling with the use of the systems of differential equations one of the objectives is the choice of finite-difference schemes. The main selection criterion is the accuracy, speed of convergence and stability. Implicit finite-difference schemes are more accurate, faster in convergence and stability in comparison with explicit ones. The problem of stability is particularly important when solving stiff equations such as the equations of motion taking forces of tension into account, when at transients abrupt multiple changes in the value of the tension force is possible. The article examines the problem of modeling the dynamics of the trawl system, based on the mathematical model of interacting particles, the implicit finite-difference Euler method. We have calculated the dependencies of the internal forces from moving the nodes and their partial derivatives for velocity and displacement and dependencies of hydrodynamic force from speed. Authors proposed the methods for calculating the

partial derivatives of the hydrodynamic forces on speed and movement, linearization of systems of differential equations of motion and solving the resulting system of linear algebraic equations.

Keywords: trawl, hydrodynamics, discrete mathematical model, interacting particles, implicit finite-difference schemes, Euler's method

Введение

В процессе моделирования динамики траловой системы необходимо учитывать влияние как внешних сил: гидростатических и гидродинамических, действующих на элементы трала, сил воздействия судна на канатную часть трала, так и внутренние силы воздействия элементов трала друг на друга (канатной-сетной части, плавов, подъемных и распорных устройств [1,2], и др.).

Сетная часть реального донного трала может состоять из 100 тысяч ячеек [3] (см. рис. 1 и 2). Так как при дискретном моделировании необходимо описать несколько параметров для каждой нитки, каждого троса и каната (позиция, нагрузка, соединение и т. д.), то для моделирования всех ячеек требуется большое количество вычислительных ресурсов. Для их экономии обычно в передней части трала принимается масштаб от 1:1 (каждая ячейка моделируется) до 1:10, а в концевых частях его принимают равным 1:20. Куток обычно заменяют сосредоточенной силой. За счёт этого удаётся существенно уменьшить необходимые для моделирования вычислительные ресурсы, при этом появляется возможность достаточно точно моделирования динамики траловой системы в реальном времени.

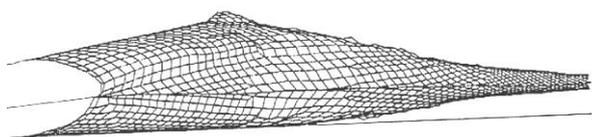


Рис. 1. Вид сбоку сетной части трала, рассчитанного с помощью дискретной модели

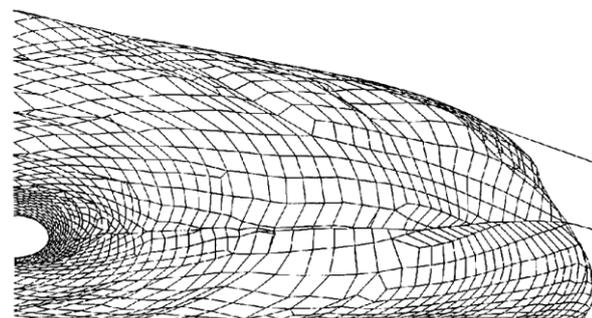


Рис. 2. Вид спереди (со стороны устья) половины сетной части трала, рассчитанного с помощью дискретной модели

При моделировании динамики траловой системы одним из методов конечных элементов для решения систем дифференциальных уравнений могут использоваться как явные, так и неявные конечно-разностные схемы. Последние

обычно обладают лучшей надежностью и более быстрой сходимостью, но более сложны в реализации.

В данной статье будет рассмотрена математическая модель траловой системы, основанная на модели взаимодействующих частиц [4], и метод вычисления при помощи неявной конечно-разностной схемы Эйлера [5].

1. Цель и задачи

При дискретном моделировании с использованием систем дифференциальных уравнений одной из задач является выбор конечно-разностной схемы. Основными из критериев выбора является точность, скорость сходимости и устойчивость.

Неявные конечно-разностные схемы отличаются большей точностью, более быстрой сходимостью и устойчивостью по сравнению с явными. Недостатком неявных схем можно считать их сложность. Проблема устойчивости особенно важна при решении жестких систем дифференциальных уравнений, когда при переходных процессах возможно скачкообразное многократное изменение величин. К таким уравнениям относятся и дифференциальные уравнения движения с учетом сил натяжения. В них при незначительном перемещении возможны значительные кратковременные изменения сил натяжения.

В неявных конечно-разностных схемах на каждом временном шаге моделирования значения искомых величин берутся не с предыдущего (уже вычисленного) временного слоя, а со следующего (еще неизвестного). Таким образом для нахождения неизвестных необходимо решить систему уравнений.

Задачей при разработке математической модели является сведение систем уравнений к линейным. Обычно задача линеаризации не имеет аналитического решения. Поэтому прибегают к упрощениям, заменяя значения некоторых входных неизвестных нелинейными коэффициентами, значения которых берутся с предыдущего временного слоя (уже вычисленные). При этом временной шаг разбивается на дробные шаги коррекции нелинейных коэффициентов.

2. Материалы и методы

Математическая модель взаимодействующих частиц (точечных масс) основывается на методе конечных элементов (дискретизация) и описании зависимостей силовых и геометрических характеристик, и перемещений от силовых и пространственно-временных характеристик с учетом масс [4]. Применительно к траловой системе это зависимости удлинения ниток, канатов, тросов, от сил натяжения в них;

зависимости перемещения и скоростей от времени и сил.

В модели взаимодействующих частиц траловая система представляется множеством точечных масс (узлов) с такими известными и искомыми параметрами, как масса, скорость, перемещение, внешняя сила, и связей между узлами с такими известными и искомыми параметрами, как длина связи и сила натяжения.

Запишем уравнения движения узла в векторной форме:

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i, \quad (1)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_i + R_i + Q_i \quad (2)$$

при начальных условиях:

$$r_i|_{t_0} = r_0, \quad v_i|_{t_0} = 0, \quad (3)$$

где r_i – положение узла; v_i – скорость узла; t – время; F_i – сумма внутренних сил, действующих на узел со стороны других узлов; m_i – масса, сосредоточенная в узле (с учетом присоединенной массы); R_i – гидродинамическая сила; Q_i – другие силы, включая гидростатические (см. рис. 3).

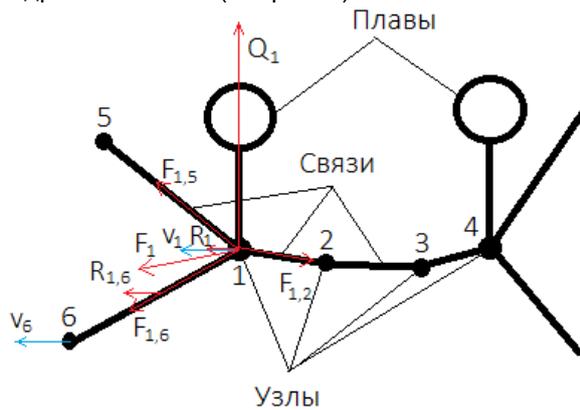


Рис. 3. Модель взаимодействующих частиц

Решим полученную систему неявным методом Эйлера [5,6], являющимся абсолютно устойчивым, используя конечно-разностную схему:

$$r_i^{[n+1]} - r_i^{[n]} = h v_i^{[n+1]}, \quad (4)$$

$$v_i^{[n+1]} - v_i^{[n]} = \frac{h}{m_i} (F_i^{[n+1]} + R_i^{[n+1]} + Q_i), \quad (5)$$

где h – шаг по времени.

Обозначив

$$F_i^{[n+1]} + R_i^{[n+1]} + Q_i = f_i(v_i^{[n+1]}, r_i^{[n+1]}), \quad (6)$$

$$v_i^{[n+1]} - v_i^{[n]} = \Delta v_i, \quad r_i^{[n+1]} - r_i^{[n]} = \Delta r_i \quad (7)$$

и применив разложение функции f_i в ряд Тейлора в окрестностях $f_i(v_i^{[n]}, r_i^{[n]})$ с аппроксимацией первого порядка, получим:

$$f_i(v_i^{[n]} + \Delta v_i, r_i^{[n]} + \Delta r_i) = f_i(v_i^{[n]}, r_i^{[n]}) + \frac{\partial f_i(r_i, v_i)}{\partial r_i} \Delta r_i + \frac{\partial f_i(r_i, v_i)}{\partial v_i} \Delta v_i. \quad (8)$$

Подставив (8) и (4) в (5) получим:

$$\Delta v_i = \frac{h}{m_i} \left(f_i(v_i^{[n]}, r_i^{[n]}) + \frac{\partial f_i(r_i, v_i)}{\partial r_i} h(v_i^{[n]} + \Delta v_i) + \frac{\partial f_i(r_i, v_i)}{\partial v_i} \Delta v_i \right). \quad (9)$$

Перегруппировав отдельные составляющие (9) запишем систему уравнений для всех узлов в матричном виде:

$$A \Delta v = b, \quad (10)$$

$$A = M - h \frac{\partial f(v, r)}{\partial v} - h^2 \frac{\partial^2 f(v, r)}{\partial v \partial r} \quad (11)$$

$$b = h f(v^{[n]}, r^{[n]}) + h \frac{\partial f(v, r)}{\partial r} v^{[n]}$$

где A – матрица размером $3N \times 3N$; M – диагональная матрица узловых масс размером $3N \times 3N$; $\Delta v, v^{[n]}, f(v, r)$ и b – вектора размером $3N$; N – количество узлов в модели.

Разрешив (10) относительно Δv и подставив Δv_i в (4) и (7) найдем искомые $v_i^{[n+1]}$ и $r_i^{[n+1]}$ для всех узлов.

Для нахождения $f(v, r)$ и ее частных производных необходимо вычислить F_i и R_i и задать Q_i на временном слое $[n]$. Обозначив

$$r_{ij} = r_j - r_i, \quad v_{ij} = \frac{v_j + v_i}{2} \text{ получим:}$$

$$F_i = \sum_{j \in N_i} \frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \left(1 - \frac{L_{0,ij}}{r_{ij}} \right) r_{ij}, \quad (12)$$

$$R_i = \sum_{j \in N_i} (R_{L,ij} - R_{D,ij}), \quad (13)$$

$$R_{D,ij} = \frac{c_{D,ij} v_{ij} \rho d_{ij}}{2} \sqrt{r_{ij}^2 - r_{x,ij}^2} v_{ij}, \quad (14)$$

$$R_{L,ij} = \frac{c_{L,ij} v_{ij}^2 \rho d_{ij}}{2} r_{x,ij} \frac{n_{L,ij}}{n_{L,ij}}, \quad (15)$$

$$r_{x,ij} = \frac{v_{ij} \square r_{ij}}{v_{ij}}, \quad n_{L,ij} = v_{ij} \times (v_{ij} \times r_{ij}), \quad (16)$$

где d_{ij} – диаметр веревки; E_{ij} – модуль Юнга веревки; $L_{0,ij}$ – длина участка веревки до деформации; $R_{D,ij}$ – сила сопротивления; $R_{L,ij}$ – подъемная сила; $c_{D,ij}$ – гидродинамический коэффициент силы сопротивления; $c_{L,ij}$ – гидродинамический коэффициент подъемной силы; ρ – плотность воды; $n_{L,ij}$ – вектор по направлению подъемной силы; $r_{x,ij}$ – проекция участка веревки на ось OX после деформации; N_i – множество узлов, связанных с узлом i ; \square – скалярное произведение; \times – векторное произведение.

Частная производная внутренних сил по скорости для всех узлов:

$$\frac{\partial F_i}{\partial v_i} = 0. \quad (17)$$

Матрица частная производных внутренних сил по перемещению является квадратной матрицей, состоящей из $N \times N$ блоков размером 3×3 . Каждый блок характеризует изменение внутренней силы под действием перемещения для узла i от узла j , где i, j – номер блока по столбцам и строкам матрицы:

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial r_1} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial r_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_1}{\partial r_N} & \dots & \frac{\partial F_N}{\partial r_N} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial r_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{x,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{x,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{x,j}} \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{y,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{y,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{y,j}} \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{z,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{z,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{z,j}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Продифференцировав (12) для составляющей по координате x получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{x,j}} &= \frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} (r_{ij}^2 - r_{x,ij}^2) - r_{ij}^3}{r_{ij}^3}, \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{y,j}} &= -\frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} r_{x,ij} r_{y,ij}}{r_{ij}^3}, \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{z,j}} &= -\frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} r_{x,ij} r_{z,ij}}{r_{ij}^3}. \end{aligned} \quad (20)$$

Аналогично для составляющих по координатам у и z.

Аналогичный (18) и (19) вид имеют матрицы для сил гидродинамического сопротивления (13). Для нахождения частных производных можно воспользоваться разностной схемой:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{x,i}}{\partial v_{x,j}} &= \frac{1}{2h_v} (R^+ - R^- + |R^+| - |R^-|), \\ R^+ &= R_{x,ij} (v_{x,ij} + h_v, v_{y,ij}, v_{z,ij}, \mathbf{r}_{ij}), \\ R^- &= R_{x,ij} (v_{x,ij} - h_v, v_{y,ij}, v_{z,ij}, \mathbf{r}_{ij}), \end{aligned} \quad (21)$$

где h_v – шаг интегрирования по скорости, например $v_{max}/1000$; v_{max} – максимальная скорость.

В схеме для повышения устойчивости используются противоточные производные.

Аналогично (17) находится частная производная по перемещению.

Для решения системы линейных уравнений (10) можно воспользоваться методом сопряженных градиентов [7]:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{v}_0 &= \mathbf{b}, \quad \delta_0 = \mathbf{k}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{v}_0, \\ \alpha_i &= \frac{\mathbf{k}_i^T \mathbf{k}_i}{\delta_i^T \mathbf{A} \delta_i}, \quad \Delta \mathbf{v}_{i+1} = \Delta \mathbf{v}_i + \alpha_i \delta_i, \\ \mathbf{k}_{i+1} &= \mathbf{k}_i - \alpha_i \mathbf{A} \delta_i, \\ \beta_{i+1} &= \frac{\mathbf{k}_{i+1}^T \mathbf{k}_{i+1}}{\mathbf{k}_i^T \mathbf{k}_i}, \quad \delta_{i+1} = \mathbf{k}_{i+1} + \beta_{i+1} \delta_i, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\alpha, \beta, \delta, \mathbf{k}$ – временные переменные.

В качестве критерия остановки итерационного процесса используем $k_i < \epsilon$, где ϵ – требуемая точность вычислений.

3. Результаты

В статье было рассмотрено решение задачи моделирования динамики траловой системы, основанной на математической модели взаимодействующих частиц, неявным конечно-разностным методом Эйлера.

Выводы

В статье:

- получены зависимости внутренних сил от перемещения узлов (12) и их частные производные по скорости и перемещению (20);
- получены зависимости гидродинамических сил от скорости (13);
- предложен метод расчета частных производных гидродинамических сил по скорости и перемещению (21);
- предложен метод линеаризации систем дифференциальных уравнений движения;
- предложен метод решения систем линейных алгебраических уравнений (22).

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ №15-08-00464-а.

Литература

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - С. 154-157.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - С. 168-173.
3. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. Гриф УМО. М. - Моргкнига. - 2011. 528 с.
4. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.
5. Бабенко К. И. Основы численного анализа. М.: Наука. 1986.
6. Эйлер Л. Интегральное исчисление. Том 1. — М.: ГИТТЛ. 1956.
7. Максимов Ю. А. Алгоритмы линейного и дискретного программирования. — М.: МИФИ, 1980.

References

1. Nedostup A.A., Razhev A.O. A mathematical model of interaction of the trawl door with the aquatic environment. Marine Intelligent Technologies. №3(37) Т.1. 2017. - p. 154-157.
2. Nedostup A.A., Razhev A.O. Software to study hydrodynamics of the otter doors. Морские интеллектуальные технологии. Marine Intelligent Technologies. №3(37) Т.1. 2017. - p. 168-173.
3. Rozenshtein MM, Nedostup AA Mechanics of fishing gears. Moscow. - Morkniga. - 2011. 528 pp.

4. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.
5. Babenko K.I. Fundamentals of numerical analysis. M. Science. 1986.
6. Euler L. Integral calculus. Volume 1. Moscow. GITTLE. 1956.
7. Maksimov Yu. A. Algorithms of linear and discrete programming. Moscow. MIFI, 1980.

УДК 532.5.13, 539.3, 519.61, 639.2.081.117.21

ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИБКОГО ПОДЪЕМНОГО ТРАЛОВОГО ЩИТКА

Александр Алексеевич Недоступ

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев

соискатель кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Виктор Константинович Коротков

доктор технических наук, профессор кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
тел. (4012) 34-95-04

Аннотация

В статье рассмотрена математическая модель гибкого подъемного тралового щитка, изготовленного из прямоугольного отрезка многослойной полиуретановой ленты, основанная на модели взаимодействующих частиц. Щиток крепится к гужу верхней подборки и ориентирован под определенным углом атаки к потоку жидкости. В статье выделены достоинства предложенной модели по сравнению с математической моделью тканевых материалов, а именно: в предложенной модели учитывается многослойность материала, деформационные свойства и толщина слоев; учитываются такие характеристики реальных материалов слоев, как модуль продольной упругости и модуль упругости при сдвиге; уменьшена трудоемкость алгоритма путем уменьшения максимального количества связей на узел. Устранен недостаток модели тканевых материалов, которым является ее практическая неприменимость при точном моделировании и расчетах напряжений реальных изделий с заданными характеристиками жесткости, так как используемые в модели коэффициенты упругости очень сложно вычислить.

Ключевые слова: траловый щиток, гидродинамика, дискретная математическая модель, взаимодействующие частицы, сопротивление материалов, деформация

DISCRETE MATHEMATICAL MODEL OF THE TRAWL LIFTING FLEXIBLE HYDRODYNAMIC FLAP

Alexander A. Nedostup

PhD, associate professor of the industrial fisheries department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey O. Razhev

research scholar of the industrial fisheries department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: progacpp@live.ru

Viktor K. Korotkov

Dr.Sci.Tech., professor of the industrial fisheries of department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospekt 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
tel: (4012) 34-95-04

Abstract

In the article the mathematical model of a trawl lifting flexible hydrodynamic flap of a rectangular segment of a multilayer polyurethane tape based on the model of interacting particles is considered. The trawl lifting flexible hydrodynamic flap is attached to the headrope of the trawl headline and is oriented at a certain angle of attack to the flow of water. In the article of the proposed model in comparison with the mathematical model of fabric materials are singled out in the article, namely: the multilayered material, deformation properties and layer thickness are taken into account in the proposed model; the characteristics of the real materials of the layers, such as the longitudinal elastic modulus and the shear modulus, are taken into account; the complexity of the algorithm is reduced by decreasing the maximum number of links per node. The lack of the model of fabric materials, which is its practical inapplicability for accurate modeling and calculation of the stresses of real products with given stiffness characteristics, is eliminated, since the elasticity coefficients used in the model are very difficult to calculate.

Keywords: trawl lifting flexible hydrodynamic flap, hydrodynamics, discrete mathematical model, interacting particles, material resistance, deformation

Введение

В отличие от распорных траловых досок [1,2], используемых для обеспечения горизонтального раскрытия, гидродинамический щиток используется для придания подъемной силы верхней подборе трала с целью обеспечения вертикального раскрытия его устья. В данной статье рассмотрим гибкий щиток, изготовленный из прямоугольного отрезка полиуретановой ленты (см. рис. 1). Щиток крепится к гужу верхней подборы и ориентирован под определенным углом атаки к потоку жидкости.

Гибкий гидродинамический щиток обладает всеми свойствами тканевых материалов и может быть смоделирован с использованием соответствующих математических моделей тканей. Материал щитка имеет многослойную структуру (см. рис. 2). Поэтому для повышения точности моделирования необходимо учитывать различия в характеристиках разных слоев.

В математической модели тканевых материалов [3] определены зависимости, связывающие силовые и геометрические характеристики с учетом деформации растяжения/сжатия, сдвига и изгиба (связи между узлами сетки). В данной модели вводится до 12 связей на каждый узел (см. рис. 3).

Описанная модель хорошо подходит для моделирования пространственно-временных характеристик материала при визуализации. Недостатком модели является ее практическая неприменимость при точном моделировании и расчетах напряжений реальных изделий с заданными характеристиками жесткости, так как используемые в модели коэффициенты упругости очень сложно вычислить.



Рис. 1. Гидродинамический щиток из полиуретановой ленты



Рис. 2. Лента полиуретановая

1 – точка крепления ваера; 2, 3 – точки крепления лопаток

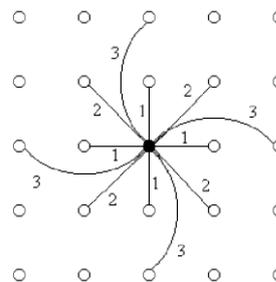


Рис. 3. Взаимодействия в ткани

1 – сжатие/растяжение; 2 – сдвиг, 3 – изгиб

1. Цель и задачи

Для устранения недостатков описанной выше математической модели авторами статьи предлагается подход, уменьшающий количество связей на узел до 4 и однозначно определяющий коэффициенты упругости с учетом многослойности материала и толщины его слоев.

2. Материалы и методы

В математической модели взаимодействующих частиц [4] описывается связь между силовыми и пространственно-временными характеристиками через узлы (точечные массы) и связи между ними. Сплошное тело (в данном случае мягкое тело) разбивается на множество элементов (точечных масс) с заданной степенью дискретизации.

Для обеспечения необходимой точности моделирования очень важно правильно разместить точечные массы в объеме тела и правильно определить все связи, не забывая при этом оптимизировать их количество.

В предложенной математической модели точечные массы размещены в узлах прямоугольной регулярной сетки на поверхности щитка (см. рис. 4). Связи (взаимодействия) каждой точечной массы только с соседними четырьмя точечными массами. Размер сетки по длине – $n+1$ узлов, по ширине – $m+1$ узлов.

На рис. 4 показан один слой многослойного материала толщиной a . Остальные слои накладываются на эту же сетку (узлы и связи у разных слоев общие, но толщина и модули упругости разные).

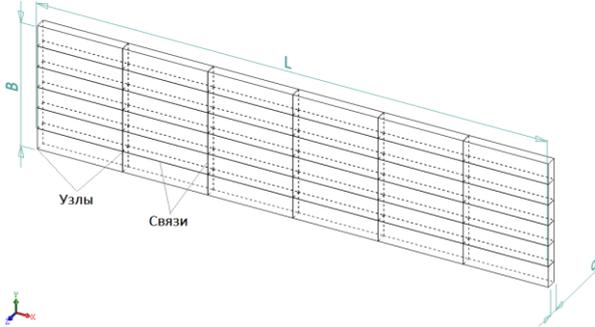


Рис. 4. Модель взаимодействующих частиц гидродинамического щитка a – толщина слоя; L – длина щитка; B – ширина щитка

В теории сопротивления материалов различают четыре типа деформации: растяжения/сжатия, сдвига, изгиба и кручения. Деформацией сдвига по толщине щитка (сдвига поверхностей щитка) можно пренебречь, так как толщина материала много меньше его длины и ширины, и материал скреплен по краям. Деформация кручения имеет место только для тел с осью вращения, когда в процессе кручения его геометрия практически не меняется. Ее мы также не учитываем.

Определим зависимости, связывающие силовые и геометрические характеристики при сжатии/растяжении и сдвиге. Исходя из закона Гука в векторной форме для однородного и изотропного материала:

$$\sigma = E\varepsilon, \tau = G\gamma, \quad (1)$$

где σ – нормальное напряжение; E – модуль продольной упругости (модуль Юнга); ε – относительная линейная деформация; τ – касательное напряжение; G – модуль упругости при сдвиге; γ – угловая деформация.

Применительно к нашей модели для каждой из четырех связей, инцидентных узлу (см. рис. 5):

$$\varepsilon = \frac{\Delta r - \Delta r_0}{\Delta r_0} \Delta \mathbf{r}, \quad (2)$$

где Δr – длина связи после деформации; Δr_0 – длина связи в свободном состоянии; $\Delta \mathbf{r}$ – вектор

связи (для показанной на рис. 5 связи между узлами $\mathbf{r}_{i,j}$ и $\mathbf{r}_{i+1,j}$ $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{i+1,j} - \mathbf{r}_{i,j}$).

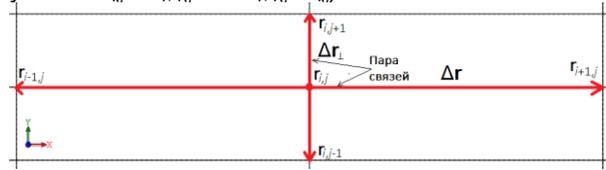


Рис. 5. Связи, инцидентные узлу $\mathbf{r}_{i,j}$

В результате для каждого узла (кроме граничных) получим четыре значения вектора нормального напряжения.

Для каждой пары продольной и поперечной связи (всего четыре пары, см. рис. 5):

$$\gamma = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta r} \arccos \frac{\Delta \mathbf{r} \bullet \Delta \mathbf{r}_\perp}{\Delta r \Delta r_\perp}, \quad (3)$$

где \perp обозначает перпендикулярную в свободном состоянии связь; \bullet - знак скалярного произведения векторов.

С учетом того, что при малых деформациях $\gamma \approx \text{tg } \gamma$ выражение (3) можно записать в виде без трудоемкой функции арккосинуса:

$$\gamma = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta r} \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathbf{r} \Delta \mathbf{r}_\perp}{\Delta \mathbf{r} \bullet \Delta \mathbf{r}_\perp} \right)^2 - 1} \quad (4)$$

Сила противодействия растяжению/сжатию или сдвигу для каждого узла вычисляется как сумма произведений соответствующих напряжений на площадь поперечного сечения, приходящуюся на узел в направлении связи до деформации:

$$\mathbf{T} = \sum^4 \sigma S_{L(B)}, \mathbf{Q} = \sum^4 \tau S_{L(B)}, S_L = \frac{Ba}{m}, S_B = \frac{La}{n}, \quad (5)$$

где \mathbf{T} – сила растяжения/сжатия; \mathbf{Q} – сила сдвига; S_L – площадь поперечного сечения, приходящаяся на узел по ширине щитка; S_B – площадь поперечного сечения, приходящаяся на узел по длине щитка; B – ширина, L – длина щитка; a – толщина слоя материала.

Для граничных узлов площадь необходимо делить на два. Для многослойного материала вычисляются и суммируются напряжения по каждому слою.

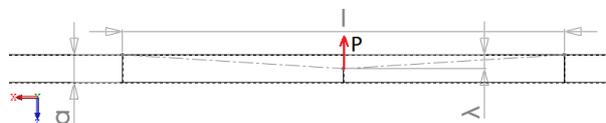


Рис. 6. Расчет силы изгиба

Определим зависимости, связывающие силовые и геометрические характеристики при изгибе. Исходя из теории сопротивления материалов сила противодействия изгибу \mathbf{P} , приложенная к середине пластины в векторной форме (см. рис. 6):

$$\mathbf{P} = \frac{4Eba^3}{l^3} \lambda, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\Delta \mathbf{r}_1 \bullet (\Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2)}{(\Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2)^2} (\Delta \mathbf{r}_1 + \Delta \mathbf{r}_2) - \Delta \mathbf{r}_1, \quad (7)$$

где b – ширина, a – толщина слоя, l – длина пластины; λ – вектор стрелы прогиба.

Применительно к модели щитка для продольного направления:

$$b = B / m, l = 2L / n, \Delta r_1 = r_{i,j} - r_{i-1,j}, \Delta r_2 = r_{i+1,j} - r_{i,j},$$

для поперечного направления:

$$b = L / n, l = 2B / m, \Delta r_1 = r_{i,j} - r_{i,j-1}, \Delta r_2 = r_{i,j+1} - r_{i,j}.$$

Сила противодействия изгибу для каждого узла щитка (кроме граничных) вычисляется как сумма \mathbf{P} для продольного и поперечного направлений. Для граничных узлов \mathbf{P} принимается равной 0. Для многослойного материала вычисляются и суммируются \mathbf{P} по каждому слою.

Внутренняя сила \mathbf{F}_i , действующая на узел в результате деформации определяется как сумма сил противодействия сжатию/растяжению, сдвигу и изгибу:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{T} + \mathbf{Q} + \mathbf{P}. \quad (8)$$

Итоговая сила \mathbf{F} , действующая на узел, является суммой внутренних и внешних сил (гидростатических и гидродинамических):

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_q + \mathbf{R}, \mathbf{F}_q = \frac{BLa}{nm} (\rho - \rho_w) \mathbf{g}, \quad (9)$$

где ρ – плотность материала слоя; ρ_w – плотность воды; \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения (направлен к дну водоема); \mathbf{F}_q – гидростатическая сила (плавучесть); \mathbf{R} – сила гидродинамического сопротивления; \mathbf{v} – скорость потока жидкости относительно узла.

Силу \mathbf{R} , приложенную к узлу найдем как сумму сил гидродинамического сопротивления \mathbf{R}_i , действующих на четыре смежных треугольных поверхностей с общей вершиной в узле (см. рис. 7):

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{R}_i. \quad (10)$$

Для вершин на краях щитка таких поверхностей две, а на углах щитка – одна.

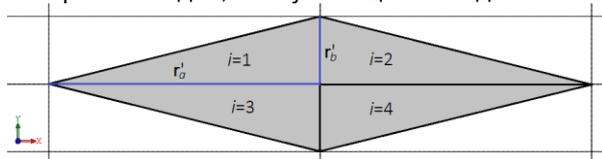


Рис. 7. Расчет силы \mathbf{R}

Для нахождения сил гидродинамического сопротивления необходимо выполнить преобразование поворота модельной системы

координат в расчетную так, чтобы ее координатная ось Ox совпадала по направлению с вектором скорости \mathbf{v} , найти силу гидродинамического сопротивления \mathbf{R}' в новой системе координат, а после над силой выполнить обратное преобразование поворота:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{rM}, \mathbf{R} = \mathbf{R}'\mathbf{M}^{-1}, \quad (11)$$

где \mathbf{M} – матрица поворота, \mathbf{r}' – координаты узлов в расчетной системе координат. Тогда для треугольника $i=1$ получаем:

$$\mathbf{R}'_1 = \mathbf{c} \frac{\rho_w V^2}{2} S_1, S_1 = \frac{1}{2} |\mathbf{r}'_a \times \mathbf{r}'_b|, \quad (12)$$

где $\mathbf{c} = (c_x, c_y, c_z)$ – вектор гидродинамических коэффициентов для плоской пластины; S_1 – площадь треугольника; \times – обозначение векторного произведения.

Аналогично вычисляются силы для остальных трех треугольников.

Для уменьшения трудоемкости вычислений при определении \mathbf{R}' и \mathbf{c} можно воспользоваться разложением в ряд Тейлора 4-го порядка, описанный в [5].

3. Результаты

В статье была рассмотрена математическая модель гибкого гидродинамического тралового щитка, выполненного из многослойного материала, основанная на модели взаимодействующих частиц.

Выводы

В отличие от имеющихся математических моделей тканевых материалов данная модель обладает следующими достоинствами:

- учитывается многослойность материала, деформационные свойства и толщина слоев;
- учитываются такие характеристики материалов слоев, как модуль продольной упругости и модуль упругости при сдвиге;
- уменьшена трудоемкость алгоритма по сравнению с алгоритмом [1] из-за уменьшения максимального количества связей на узел с 12 до 4.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ №15-08-00464-а.

Литература

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. С. 154-157.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. С. 168-173.
3. Ландовский В.В. Вычислительная математика. Методические указания к курсовой работе для студентов III курса дневного отделения АВТФ направления 230100 «Информатика и вычислительная техника». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 32 с.
4. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.

5. Недоступ А.А., Ражев А.О. Расчет сил гидродинамического сопротивления сетных орудий рыболовства в задачах имитационного их моделирования. Известия КГТУ. №42. 2016. С. 185-192.

References

1. Nedostup A.A., Razhev A.O. A mathematical model of interaction of the trawl door with the aquatic environment. Marine Intelligent Technologies. №3(37) Т.1. 2017. p. 154-157.
2. Nedostup A.A., Razhev A.O. Software to study hydrodynamics of the otter doors. Морские интеллектуальные технологии. Marine Intelligent Technologies. №3(37) Т.1. 2017. p. 168-173.
3. Landovsky V.V. Computational Mathematics. Methodical instructions to the course work for the students of the III-rd day department of the AVTF direction 230100 "Informatics and computer technology". - Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2008. 32 p.
4. Nedostup A.A., Razhev A.O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.
5. Nedostup A.A., Razhev A.O. Calculation of the forces of hydrodynamic resistance of net fishing gears in the tasks of simulation of their modeling. Izvestia of KSTU. №42. 2016. p. 185-192.

УДК: 654.16

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ ДЛЯ СИСТЕМ С ВОСЬМИУРОВНЕВОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

Елена Вячеславовна Волхонская

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей

доцент кафедры теоретических основ радиотехники
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Мargarita Владимировна Рушко

аспирант кафедры судовых радиотехнических систем
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: margarita_rushko@inbox.ru

Аннотация

Исследование радиосигналов с фазовой манипуляцией является актуальной задачей ввиду массового использования последних в спутниковых системах навигации и связи, например, в следующих системах: Iridium, Globalstar, GPS, Глонасс, Inmarsat, Turaya, Beidou и т.д.; в стандартах протоколов локальных сетей и цифрового телевидения.

В данной работе представлен алгоритм оценки вероятности битовой ошибки для систем с восьмиуровневой фазовой манипуляцией, разработанный в среде MATLAB+Simulink, а также структурные схемы и осциллограммы, поясняющие работу алгоритма.

Исследования, проведенным с представленным алгоритмом, подтвердили адекватность известных теоретических положений о помехоустойчивости радиосигналов с фазовой манипуляцией. Результаты исследований и виртуальная лабораторная установка могут найти применение при сравнительной оценке помехоустойчивости канала радиосвязи с использованием стандартных и перспективных запатентованных систем передачи информации в рамках морской подвижной службы при приеме фазоманипулированных радиосигналов.

Ключевые слова: цифровая обработка, фазовая манипуляция, битовая ошибка, ОСШ, помехоустойчивость.

BIT ERROR PROBABILITY ESTIMATING ALGORITHM FOR SYSTEMS WITH EIGHT-LEVEL PHASE MANIPULATION

Elena V. Volkhonskaya

Dr.Sci.Tech., associate professor, professor of ship radio engineering systems department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeniy V. Korotey

associate professor of department of theoretical bases of radio engineering
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Margarita V. Rushko

PG student of ship radio engineering systems department
Kaliningrad State Technical University
ul. Molodezhnaya 6, Kaliningrad, 236029, Russian Federation
e-mail: margarita_rushko@inbox.ru

Abstract

The study of phase-manipulated radio signals seems to be an active task in view of the widespread use of these signals in satellite navigation and communication systems, for example, in the following systems: Iridium, Globalstar, GPS, Glonass, Inmarsat, Turaya, Beidou, etc. ; In the standards of protocols of local networks, as well as in the standards of digital television.

This paper presents an algorithm for estimating the bit error probability for systems with eight-level phase manipulation developed in the MATLAB + Simulink environment, as well as structural diagrams explaining the operation of the algorithm, and oscillograms confirming the adequacy of the algorithm to the existing provisions on noise immunity of phase-manipulated signals.

The studies confirmed the adequacy of the known theoretical provisions on the noise stability of phase-manipulated radio signals. The results of the research, as well as the virtual laboratory setup, will be used in a comparative assessment of interference immunity of a radio communication channel using standard and prospective patented information transmission systems within the maritime mobile service when receiving phase-manipulated radio signals.

Keywords: digital processing, phase shift keying, bit error, SNR, noise immunity

Введение

В настоящее время состояние и перспективы развития информационных технологий характеризуются становлением и широким практическим использованием техники цифровой обработки сигналов как одной из самых быстро развивающихся и динамичных технологий в мире телекоммуникаций [1].

Традиционно качество канала цифровой связи оценивают такими взаимосвязанными критериями, как вероятность битовой ошибки (Bit Error Rate, BER) и отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума (аналог отношения сигнал/шум (ОСШ) для цифровых систем связи). При этом снижение величины ОСШ всего на 1 дБ приводит к увеличению BER по крайней мере на порядок [2].

В настоящей работе представлен алгоритм оценки вероятности битовой ошибки для систем с восьмиуровневой фазовой манипуляцией (8-PSK) в среде MATLAB+Simulink.

1. Общие сведения о 8-PSK

На сегодняшний день сигналы с PSK манипуляцией широко применяются при организации спутникового канала связи в составе морской подвижной службы, в частности, при организации таких систем связи и навигации как Iridium, Globalstar, GPS, Глонасс, Inmarsat, Turaya, Beidou и т.д. [3,4], в стандартах протоколов локальных сетей IEEE 802, а также в стандартах цифрового телевидения DVB.

Одной из разновидностей PSK манипуляции является восьмипозиционная фазовая манипуляция, или 8-PSK – манипуляция, при которой существуют восемь значений фазы несущего колебания. Каждым

символом одновременно передается сразу три бита. Чтобы закодировать восемь различных фаз, входящие биты объединяются в группы по три бита, называемые трибитами ($2^3 = 8$). Таким образом, при 8-PSK модуляции битовая скорость в три раза выше символьной скорости передачи данных [5].

Такой радиосигнал может быть описан выражением (1):

$$a(t) = A_1(t)\cos(\omega_0 t + \varphi) - A_2(t)\sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

где $A_2(t) = \{\pm 1,307, \pm 0,54\}$ - значения синфазной составляющей,
 $A_2(t) = \{\pm 0,54, \pm 1,307\}$ - значения квадратурной составляющей [6].

Сигнальное созвездие 8-PSK сигнала представлено на рисунке 1.

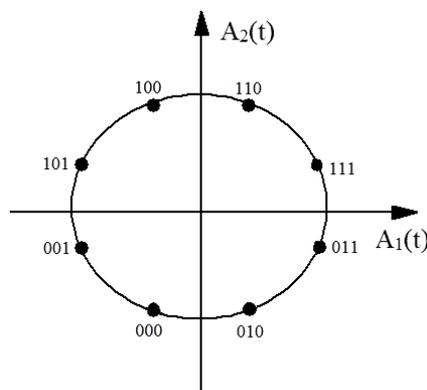


Рис. 2. Сигнальное созвездие 8-PSK сигнала

2. Алгоритм оценки BER

На рисунке 2 представлена структурная схема блока «Измеритель BER».

Четыре идентичных блока «Интегратор» предназначены для интегрирования с синхронным разрядом по окончании каждой посылки демодулированного сигнала и вспомогательных постоянных сигналов, отвечающих за пороговые уровни, задаваемые блоками «Константа 1,2,3».

Демодулированный сигнал приходит с задержкой по времени из-за наличия инерционных элементов в приемнике, например, фильтров. Блоки «ЛЗ 1,2,3» выполняют функцию синхронизации сигналов.

Пороговые уровни, равные $\{0, \pm 0,924\}$, определяют механизм соотношения реального значения квадратурных составляющих 8-PSK радиосигнала с сигнальными точками созвездия и располагаются посередине между теоретическими значениями, принимаемыми квадратурами.

$b_{\text{вых}}$	1,307	0,541	-0,541	-1,307
------------------	-------	-------	--------	--------

В таблице 2 введены следующие обозначения: S - результат интегрирования демодулированного сигнала; $S_{1,2,3}$ -

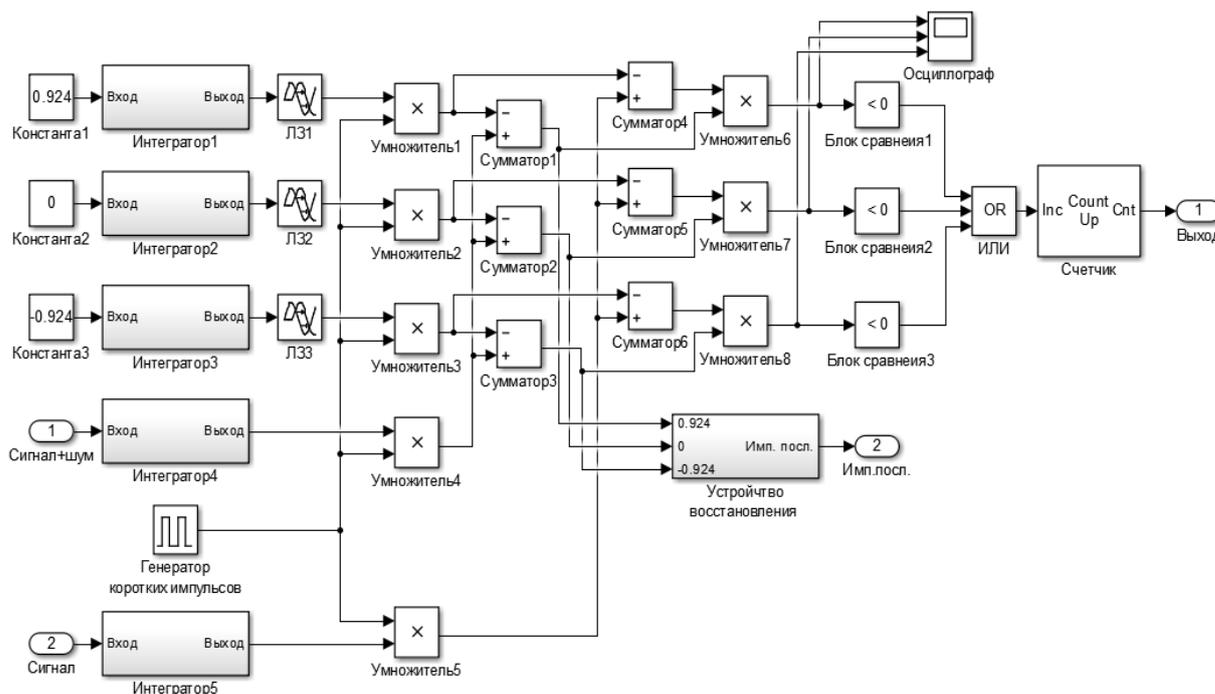


Таблица 1
Соответствие уровней квадратурного сигнала и пороговых значений

1	$b_{\text{вых}} > U_{\text{пор1}}$	1,307
2	$b_{\text{вых}} \in [U_{\text{пор2}}, U_{\text{пор1}}]$	0,541
3	$b_{\text{вых}} \in [U_{\text{пор3}}, U_{\text{пор2}}]$	- 0,541
4	$b_{\text{вых}} < U_{\text{пор3}}$	- 1,307

Блоки «Сумматор 1,2,3» предназначены для определения знака разности между результатом интегрирования демодулированного сигнала и результатами интегрирования пороговых уровней. В таблице 2 представлено соответствие уровней квадратурного сигнала и знака разности указанных сигналов.

Таблица 2
Соответствие уровней квадратурного сигнала и знака разностных сигналов

$S - S_1$	>0	<0	<0	<0
$S - S_2$	>0	>0	<0	<0
$S - S_3$	>0	>0	>0	<0

результаты интегрирования пороговых уровней $U_{\text{пор1,2,3}}$.

Ошибка в принятом символе отсутствует, если знак разностей $S - S_1$, $S - S_2$, $S - S_3$ совпадает для исходного модулирующего и демодулированного сигналов.

Для вычисления аналогичных разностей $S' - S_1$, $S' - S_2$, $S' - S_3$ по отношению к исходному модулирующему сигналу применены блоки: «Интегратор 5», «Умножитель 5», «Сумматор 4», «Сумматор 5», «Сумматор 6».

Блоки «Умножитель 6,7,8», в которых попарно перемножаются соответствующие результаты вычисления разностей $S' - S_1$, и $S - S_1$, $S' - S_2$, и $S - S_2$, $S' - S_3$, и $S - S_3$ для исходного модулирующего и демодулированного сигналов. Если результат перемножения больше нуля, то знаки разностей совпадают, в противном случае – не совпадают.

Элементы схемы «Блок сравнения 1,2,3» предназначены для определения знака каждого из данных произведений (результат на выходе блока «0» если произведение больше нуля и «1» – если меньше нуля). Блок «ИЛИ» объединяет их выходы. Если на входах блока «ИЛИ» есть хотя бы одна «1», то и на его выходе будет «1», а, значит, будет зафиксирована ошибка. Блок «Счетчик» подсчитывает число таких ошибок.

Блок «Устройство восстановления» (рисунок 3) служит для восстановления формы принятого сигнала в соответствии с решением о типе бита на интервале, соответствующем длительности посылки. Он имеет три входа, на которые подаются разности $S - S_1$, $S - S_2$, $S - S_3$. Алгоритм работы данного блока определен таблицей 2.

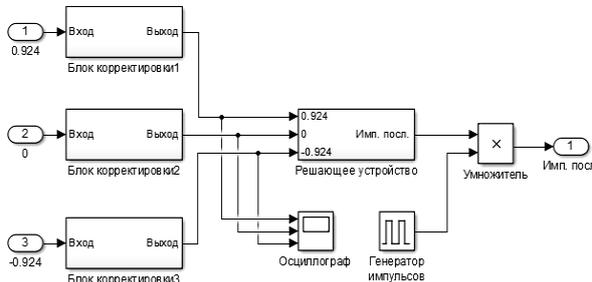


Рис. 3. Структурная схема блока «Устройство восстановления принятой кодовой последовательности»

Блок «Устройство восстановления» содержит три идентичных блока коррективы длительности импульсов и решающее устройство. Необходимость в коррективке длительности вызвана тем, что результаты интегрирования на выходе соответствующих блоков подвергались стробированию.

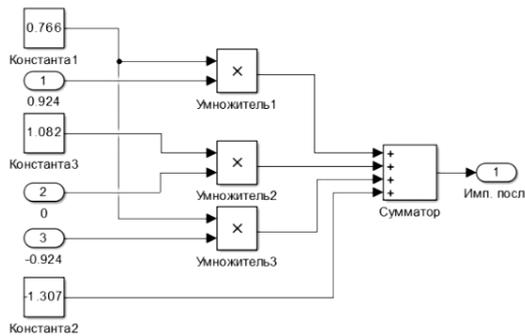


Рис. 4. Структурная схема блока «Решающее устройство»

Блок «Решающее устройство» (рисунок 4) принимает решение о типе «посылки» и работает в соответствии с функцией:

$$x_{вых} = 0,766(x_{ex1} + x_{ex3}) + 1,082x_{ex2} - 1,307 \quad (2)$$

Возможные значения входных логических сигналов и выходного сигнала в соответствие с формулой (2) приведены в таблице 3.

Таблица 3
Соответствие уровней входных и выходного сигналов блока «Решающее устройство»

Вход «0,924»	1	0	0	0
Вход «0»	1	1	0	0
Вход «-0,924»	1	1	1	0
Выход	1,307	0,541	-0,541	-1,307

Блоки «Константа 1,2,3» задают константы формулы (2): 0,766; 1,082; -1,307. Блоки «Умножитель 1,2,3» необходимы для умножения входных сигналов на соответствующие константы в соответствие с формулой (2); блок «Сумматор» используется для вычисления результата.

Блоки «Генератор импульсов» и «Умножитель» в составе блока «Устройство восстановления» (рисунок 3) позволяют исключить из рассмотренного интервал времени $[0, t_{посылки}]$ не содержащий информации, так как в результате обработки и наличия блоков «ЛЗ» сигнал смещен во времени в сторону запаздывания на $t_{посылки}$.

На рисунке 5 представлена осциллограмма начальной фазы 8-PSK радиосигнала.

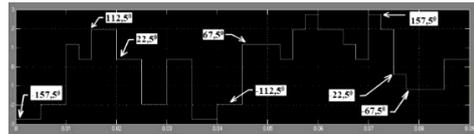


Рис. 5. Осциллограмма начальной фазы радиосигнала

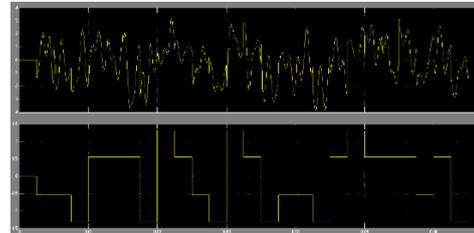


Рис. 6. Осциллограммы модулирующего сигнала (нижний рисунок) и сигнала на выходе объединителя (верхний рисунок) при низком ОСШ

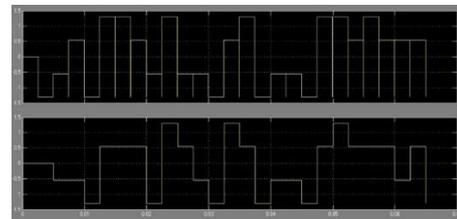


Рисунок 7 – Осциллограммы модулирующего сигнала (нижний рисунок) и сигнала с выхода блока «Измеритель BER» (верхний рисунок) при низком ОСШ

Из рисунка 5 видно, что начальная фаза принимает восемь значений, соответствующих созвездию данного радиосигнала.

На рисунках 6-7 представлены осциллограммы модулирующего сигнала и сигналов на выходах объединителя и измерителя BER при низком ОСШ.

Анализ приведенных осциллограмм показывает, что при низком значении ОСШ в принятой кодовой последовательности наблюдаются многочисленные ошибки, в то время как идентичные измерения при высоком ОСШ показывают, что выходной сигнал повторяет модулирующий, что полностью соответствует теоретическим положениям о приеме фазоманипулированных сигналов [6].

Заключение

Таким образом, результатом математического моделирования в среде MATLAB+Simulink явился алгоритм измерения вероятности битовой ошибки для систем с восьмиуровневой фазовой манипуляцией. Результаты моделирования подтвердили

адекватность известных теоретических положений о помехоустойчивости радиосигналов с фазовой манипуляцией [6].

Результаты исследований и виртуальная лабораторная установка могут найти применение при сравнительной оценке помехоустойчивости канала радиосвязи с использованием стандартных и перспективных запатентованных систем передачи информации в рамках морской подвижной службы при приеме фазоманипулированных радиосигналов.

Работа выполнена в соответствии с техническим заданием на НИР в рамках выполнения государственного задания на НИОКР, регистрационный номер АААА-А16-116041410168-3, по теме: «Разработка программного комплекса по оценке качества цифрового канала связи морской подвижной службы».

Литература

1. Зубарев Ю. Б., Витязев В. В., Дворкович В. П. Цифровая обработка сигналов – информатика реального времени [Электронный ресурс]. М.: Российское научно-техническое общество техники, электроники и связи имени С. А. Попова. 1999. URL: <http://www.dsps.ru/elmaterials/artic99-13.pdf> (дата обращения: 10.2017).
2. Измерения в цифровых системах связи. Анализ ошибок в цифровых системах передачи [Электронный ресурс]. URL: <https://skomplekt.com/tools/377334.html> (дата обращения 10.2017).
3. Маркелов, М. А. Новые сигналы GNSS и перспективы их использования в бортовом оборудовании ГА [Электронный ресурс]. М.: Интернавигация №8. 2008. URL: http://www.atminst.ru/up_files/markeldoklad.pdf (дата обращения: 10.2017).
4. Приложение № 2 к решению ГКРЧ от 23 августа 2010 г. № 10-08-08 Основные технические характеристики абонентских станций спутниковой связи системы подвижной спутниковой связи ИНМАРСАТ [Электронный ресурс]. М.: Государственная комиссия по радиочастотам. 2010. URL: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3975/> (дата обращения: 09.2017).
5. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Власова К.В., Рушко М.В. Сравнительный анализ помехоустойчивости приема сигналов с QPSK, BPSK, 8PSK и DBPSK. Калининград: V Международный Балтийский морской форум. Тезисы докладов 1. 2017. 222 с.
6. Проакис, Дж. Цифровая связь пер. с англ. под. ред Д. Д. Кловского. Москва: Радио и связь, 2000. 800 с. [Proakis J. G. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 1995].

References

1. Zubarev Yu. B., Vityazev V. V., Dvorkovich V. P. Tsifrovaya obrabotka signalov – informatika real'nogo vremeni [Digital processing of signals — Realtime informatics]. M.: Rossiyskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo tekhniki, elektroniki i svyazi imeni S. A. Popova, 1999, available at: <http://www.dsps.ru/elmaterials/artic99-13.pdf> (Accessed October 2017).
2. Izmereniya v cifrovyykh sistemakh svyazi. Analiz oshibok v cifrovyykh sistemakh peredachi [Measurements in digital communication systems. Analysis of errors in digital transmission systems]. Available at: <https://skomplekt.com/tools/377334.html> (Accessed October 2017)
3. Markelov, M. A. Novye signaly GNSS i perspektivy ikh ispol'zovaniya v bortovom oborudovanii GA [New signals of GNSS and the prospects of their use in the onboard GA equipment]. M.: *Internavigatsiya* no 8, 2008, available at: http://www.atminst.ru/up_files/markeldoklad.pdf (Accessed October 2017).
4. Prilozheniye № 2 k resheniyu GKRCCh ot 23 avgusta 2010 g. № 10-08-08 Osnovnyye tekhnicheskkiye kharakteristiki abonentskikh stantsiy sputnikovoy svyazi sistemy podvizhnoy sputnikovoy svyazi INMARSAT [The main technical characteristics of the satellite communication stations of the system of mobile satellite communication INMARSAT]. M.: Gosudarstvennaya komissiya po radiochastotam, 2010, available at: <http://www.minsvyaz.ru/ru/documents/3975/> (Accessed September 2017).
5. Volhonskaya E.V., Korotey E.V., Vlasova K.V., Rushko M.V. Sravnitel'nyy analiz pomehoustojchivosti priema signalov s QPSK, BPSK, 8PSK i DBPSK [The comparative analysis of the noise stability of reception of signals with QPSK, BPSK, 8PSK and DBPSK]. Kaliningrad: V International Baltic marine forum. Abstracts 1. 2017. 222 p.
6. Proakis J.G. Digital Communications. New York, McGraw-Hill, 1995. 800 p. (Russ. Ed.: Klovsky D. D., Nikolaev B. I. Tsifrovaya svyaz'. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 800 p.)



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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. Оригинал акта экспертизы должен быть либо прислан по почте в адрес редакции, либо доставлен 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. **Журнал публикуется в цветном варианте.**

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 9000 рублей по выставляемому 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

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 г. 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**