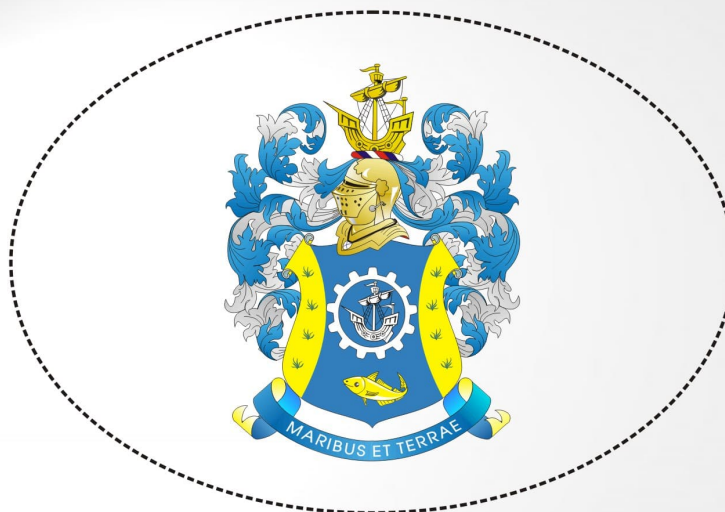


МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011101001010011011010101100010110101011010010100111010101101001101001
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
1101011000010101110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 3(37) Т.1 2017

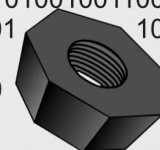
Калининградский государственный технический университет



ТРУДЫ V Международного Балтийского морского форума

21-27 мая 2017 г.

01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010
11001011110001001100001101101110111010001001101001110010001010010101000110101110100001
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110
11010110000101011101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 (37) Т.1 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, СПбГМТУ

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, СПбГМТУ

С.П. Столяров, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, СПбГМТУ

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 Редакколлегии

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 № 3 (37) V.1 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

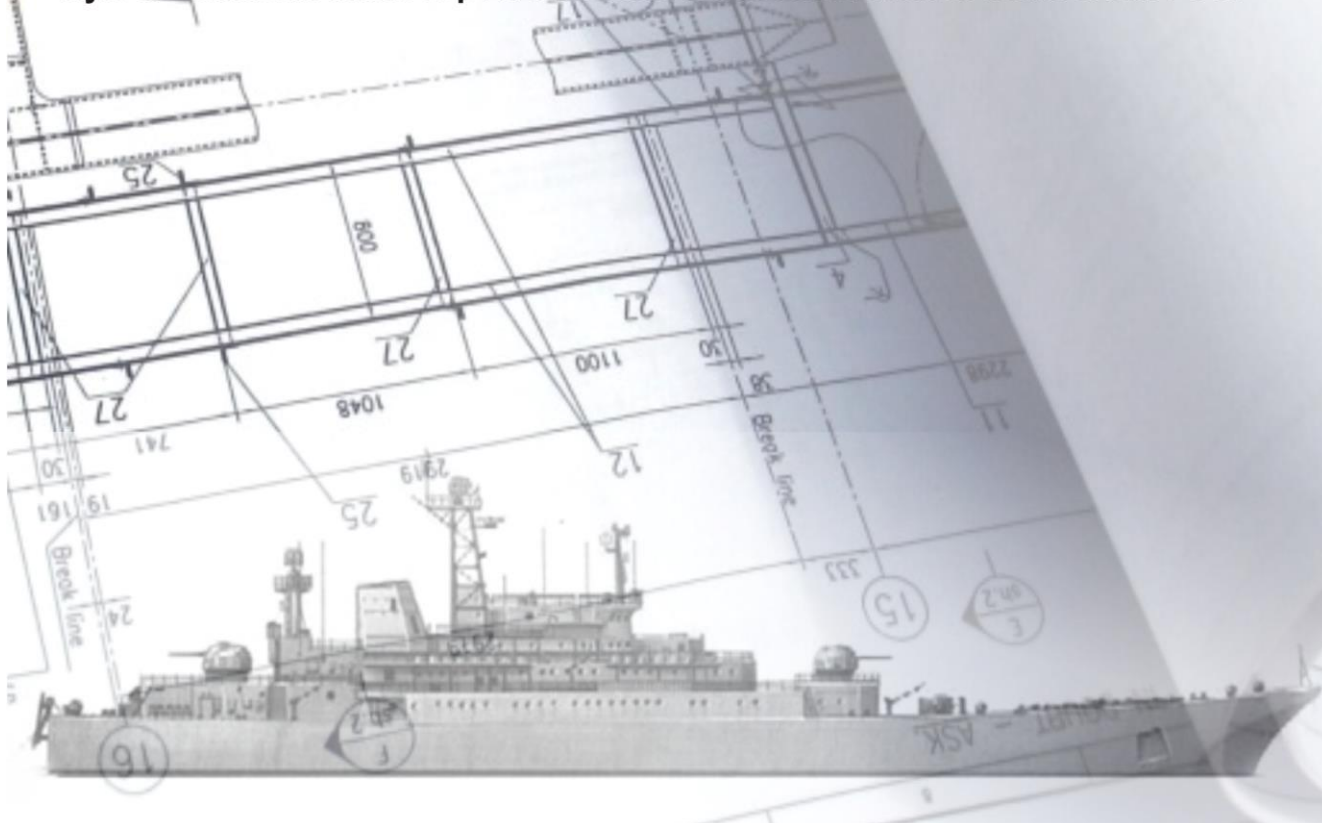
Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1600

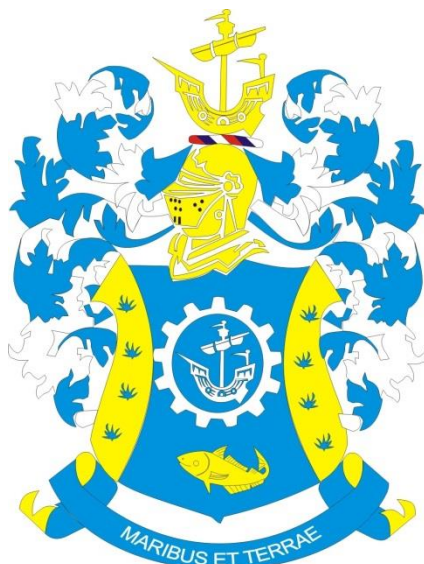
Выполнение функций проектанта по более чем 120 проектам кораблей и судов ВМФ иностранной постройки.

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.

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

May 21-27, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

О журнале	9
-----------------	---

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

П.Е. Бураковский К вопросу об учете гофрировки бортовой обшивки при дефектации балок набора судовых корпусов	11
Е.П. Бураковский, П. Е. Бураковский Сценарии гибели нефте-рудовоза MV «Derbyshire»	17
Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитриевский Математическая модель столкновения судов, движущихся параллельными курсами	23

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. И. Притыкин Распределение и концентрация напряжений во флорах с овальными и круглыми вырезами	29
---	----

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

Е. А. Чуреев К вопросу о выборе архитектурно-конструктивного типа малого рыболовного траулера для Балтийского моря	35
С. В. Дятченко, В. А. Коробчинский Математические модели для оценки прочности и вибрации средних двухпалубных траулеров на ранних стадиях проектирования	35
В. П. Иванов, С. Д. Дудин, Зыонг Ван Тхань Анализ характеристик современных малотоннажных и наливных рыболовных судов для задач их проектирования	48

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

В. И. Веревкин, В. Ф. Игушев, С. А. Терюшева Влияние содержания кремния и деформации сварных узлов из судостроительных сталей на их склонность к электрохимической коррозии ..	56
---	----

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

Н. Я. Синявский, И. Г. Мершиев Исследование судовых горюче-смазочных материалов с помощью ям релаксометрии с целью контроля качества	62
В. Ф. Белей, М. С. Харитонов Био и электромагнитная совместимость судовых систем освещения на основе светодиодных источников света	67
М. И. Архипов, А.Г.Филонов Исследование эффективности вертикальных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей	74
В. И. Одинцов, В. В. Полевой, Н. В. Свиридюк Анализ процесса теплообмена в судовых ДВС и методов его моделирования	80
Л. И. Ковальчук, М. В. Исаева Построение инвариантных экспериментально – теоретических моделей для функционального диагностирования воздушного тракта судовых дизелей с наддувом	85

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ

Т. С. Станкевич Функциональное моделирование системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров в морских портах	90
---	----

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

В. А. Бондарев, В. А. Волкогон, Ю. И. Нечаев Оперативный контроль морских катастроф на основе конкурирующих вычислительных технологий	96
А. Б. Тристанов, Р. К. Поляков Использование методов машинного обучения для поиска заданного поведения временных рядов на базе символьной агрегированной аппроксимации	104
Н. А. Кострикова, А. А. Меркулов, А. Я. Яфасов Интеллектуальные технологии в подготовке кадров для морской индустрии	109
К. В. Власова, В. А. Пахотин Алгоритм обработки радиолокационных данных с повышенным разрешением по дальности	118

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Л. М. Лукьянова Методология автоматизированного формирования целей систем производственной сферы	124
В. И. Гнатюк, О. Р. Кивчун Интеллектуальные технологии мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса	138
Н. А. Кострикова, А. А. Меркулов, А. Я. Яфасов Технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов	135
В. И. Гнатюк, О. Р. Кивчун, А. Я. Яфасов Определение потенциала энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса в рамках развития интеллектуальных энергетических систем	142

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей Математическое моделирование микрополоскового облучателя зеркальной антенны спутниковой системы связи ИНМАРСАТ-С	149
А. А. Недоступ., А. О. Ражев Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой	154
В. А. Наумов Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов	158
В. В. Медведев, В. Е. Еремичева, И. В. Тимофеева Результаты численного расчета высотного распределения кислородных компонентов верхней атмосферы Земли	163

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

А. А. Недоступ., А. О. Ражев Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок	168
---	-----

CONTENTS

page

About journal	9
---------------------	---

SHIP BUILDING

P. Burakovskiy On consideration of skin plates embossing in flaw detection of frame beams of ship hulls.....	11
E. Burakovskiy, P. Burakovskiy Scenarios of the loss of ore bulk-oil «DERBYSHIRE»	17
E. Burakovskiy, P. Burakovskiy, V. Dmitrovskiy Mathematical model of collision of vessels driven by parallel courses	23

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

A. Pritykin Stress distribution and stress concentration in floors with oval and circular openings	29
---	----

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

E. Chureev On the question of the selection of the architectural-constructive of a small fish trawler for the Baltic sea	35
S. Dyatchenko, V. Korobchinskiy Mathematical models for estimation of strength and vibration of medium double-deck trawlers at early stages of their design	35
V. Ivanov, S. Dudin, Duong Van Thanh Analysis of characteristics of modern small tonnage vessels and with wet-type storage for the purposes of preliminary design	48

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

V. Verevkin, V. Igushev, S. Turusheva The influence of silicon content and deformation of welded assemblies from shipbuilding steels their tendency to galvanic corrosion	56
--	----

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

N. Sinyavsky, I. Mershev Investigation of ship fuel lubricants by means of nmr relaxometry method for quality control	62
V. Beley, M. Kharitonov Bio and electromagnetic compatibility of shipboard lighting systems based on led light sources	67
M. Arkhipov, A. Filonov Investigation of the efficiency of vertical steam separators for ship distillation desalination plants	74
V. Odintsov, V. Polevoy, N. Sviridyuk Analysis of heat exchange process in marine diesel engines and methods of its modeling	80
L. Kovalchuk, M. Isaeva Development of invariant experimental-theoretical models for functional diagnosis of air path of ship forced-induction diesel engines	85

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

T. Stankevich Functional modeling of the information and analytical support system for fire fighting process management at seaports	90
--	----

CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION

V. Bondarev, V. Volkogon, Yu. Nechaev Operation control of marine catastrophes on the basis of competitive technologies	96
A. Tristanov, R. Polyakov Using machine learning methods to search for the given behaviour forms of time series based on symbol aggregated approximation	104
N. Kostrikova, A. A. Merkulov, A. Y. Yafasov Intelligent technologies in training for maritime industry	109

K. Vlasova, V. Pahotin Algorithm of radar data processing with the increased permission on range	118
---	-----

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

L. Lukyanova A metology for automated elaboration of goals of industrial sphere system.....	124
V. Gnatyuk, O. Kivchun Electric consumption of objects of the transport electrotechnical complex	138
N. Kostrikova, A. Merkulov, A. Yafasov Synthesis technology of distributed intelligent control systems as a tool for sustainable development of the territories and and complex objects	135
V. Gnatyuk, O. Kivchun, A. Yafasov Determination of capacity of energy saving of objecys the tranaport electronechnical complex within the framework of the development of intellectual energy systems	142

FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING

E. Volkhonskaya, E. Korotey Mathematical modeling of satellite antenna microstrip irradiator of atellite INMARSAT-C communication system	149
A. Nedostup, A. Razhev A Mathematical model of interaction of the trawl door with the aquatic enviroment	154
V. Naumov Hydrodynamic drag forces of flexible cables of towed underwater objects	158
V. Medvedev, V. Eremicheva, I. Timofeeva Results of numerical calculation of alyitude distribution oxygen components of the upper atmosphere of the Earth	163

NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS

Nedostup, A. Razhev Software to study hydrodynamics of the otter doors	168
---	-----

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

Basic Magazine Trends

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

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК 629.5.023

**К ВОПРОСУ ОБ УЧЕТЕ ГОФРИРОВКИ БОРТОВОЙ ОБШИВКИ ПРИ
ДЕФЕКТАЦИИ БАЛОК НАБОРА СУДОВЫХ КОРПУСОВ****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

Эксплуатация морских судов сопряжена с возникновением износов и остаточных деформация их корпусных конструкций. При оценке технического состояния корпусов судов нормативными документами Российского морского регистра судоходства ограничивается степень износа связей исходя из определения допускаемого остаточного момента сопротивления поперечного сечения балок набора. Однако изменение жесткостных характеристик набора может происходить не только за счет износа, но и вследствие деформирования пластин бортовой обшивки, которая является присоединенным пояском балки набора. В настоящей статье выполнено исследование влияния погибей на параметры жесткости балок набора. Показано, что с ростом гофрировки пластин обшивки сначала наблюдается некоторое снижение момента сопротивления балок набора, после чего он начинает резко расти. Полученные закономерности изменения моментов сопротивления балок набора показывают, что при развитых прогибах гофрировка оказывает положительное влияние, существенно увеличивая момент сопротивления балок набора, что необходимо учитывать при оценке технического состояния судовых корпусных конструкций. Это свидетельствует о необходимости комплексного рассмотрения вопросов дефектации наборов совместно с обшивкой, а также введения вероятностных принципов нормирования параметров эксплуатационных дефектов.

Ключевые слова: эксплуатационные дефекты, оценка технического состояния, износ, момент сопротивления, пластины обшивки, балки набора, гофрировка, нормативные ограничения

**ON CONSIDERATION OF SKIN PLATES EMBOSSED IN FLAW DETECTION
OF FRAME BEAMS OF SHIP HULLS****Pavel Burakovskiy**

Ph. D.,

Ass. professor of department of marine safety
Kaliningrad state technical university
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Abstract

Exploitation of seagoing vessels is associated with the occurrence of wear and residual deformation of their hull structures. In technical evaluation of ship hulls, regulatory documents of the Russian Maritime Register of Shipping restrict the degree of wear on the basis of the definition of the permissible resistance modulus of frame beams. However, stiffness characteristics of the framing can change not only due to wear, but also due to deformation of the side plates, which is an attached framing belt. The article is considered with the study of the effect of camber on stiffness properties of framing. It has been shown that with increasing embossed skin plates, at first there is a decrease in the resistance modulus of the framing, after which it begins to rise sharply. These patterns of change in resistance modulus of the framing show that in strong deflections, embossing has a positive effect by substantially increasing the resistance momentum of the framing which must be considered when assessing technical condition of hull structures. This proves the need for a comprehensive consideration of flaw detection in skin plates, as well as introduction of probability principles for normalization of parameters of operational defects.

Key words: operational defects, technical evaluation, wear, resistance modulus, skin plates, frame beams, embossing, regulatory restrictions

Введение

В процессе эксплуатации корпуса судов подвергаются коррозионному износу, в результате чего падает момент инерции и момент сопротивления балок судового набора. Поэтому нормативными документами Российского морского регистра судоходства [2] ограничивается степень износа связей.

$$[W_1] = n \cdot W, \quad (1)$$

где $[W_1]$ – допускаемый остаточный момент сопротивления поперечного сечения балки набора; W – момент сопротивления поперечного сечения балки, требуемый правилами постройки; n – коэффициент, принимаемый равным от 0,8 до 0,65 в зависимости от района корпуса, т.е. максимальное снижение момента сопротивления балок лежит в диапазоне от 20 до 35%.

Однако изменение жесткостных характеристик набора может происходить не только за счет износа, но и вследствие деформирования пластин бортовой обшивки, которая является присоединенным пояском балки набора, что не учитывается нормативными документами, в то время как величина стрелок прогиба бортовой обшивки регламентируется [2], исходя из принципов обеспечения безопасности самой обшивки. При этом дефектация листовых элементов осуществляется без какой-либо связи с дефектацией набора, и не обращается никакого внимания на тот факт, что характеристики жесткости балок набора могут существенно изменяться за счет деформаций присоединенного пояска балок судового набора.

1. Моделирование изменения момента сопротивления

Цель настоящего исследования заключается в изучении влияния погибей на параметры жесткости балок набора. Для проведения упрощенного анализа заменим косинусоидальную погибь пластин трапецевидной формой, состоящей из прямоугольных отрезков. Оценка точности результатов расчетов при упрощенной аппроксимации показывает, что в области максимального падения момента сопротивления расхождение результатов не превышает пяти процентов. Расчетная модель исследуемой балки приведена на рис. 1.

С целью установления закономерностей изменения момента сопротивления балки набора корпуса в настоящем исследовании осуществлялось варьирование толщиной свободного и присоединенного поясков и высотой набора.

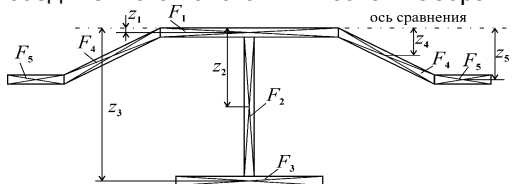


Рис. 1. Расчетная модель исследуемой балки

2. Результаты моделирования

Результаты расчета для различных жесткостей балок набора представлены на рис. 2 и рис. 3, где h – высота балки набора; a – ширина перекрытия; f – стрелка прогиба пластин при гофрировке; W_f – момент сопротивления балки набора при наличии гофрировки присоединенного пояска; W – момент сопротивления балки набора при отсутствии гофрировки присоединенного пояска.

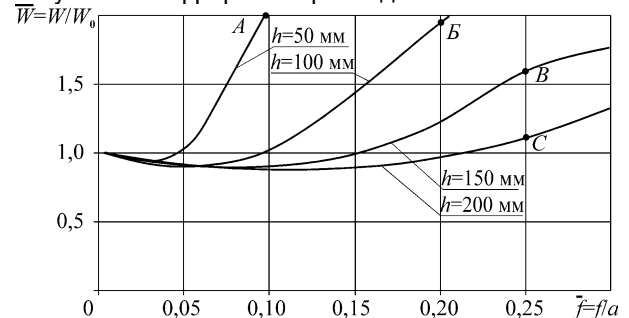


Рис. 2. Изменение момента сопротивления балки набора с ростом гофрировки пластин обшивки

Все расчеты изменения момента сопротивления балок набора в зависимости от погибей были выполнены с учетом утонения обшивки. Рассмотрим эти результаты подробнее. Так, при высоте набора $h=50$ мм (рис. 2) момент сопротивления при увеличении относительной стрелки прогиба f/a сначала падает примерно на 5% при $f/a \approx 0,03$, а затем резко начинает расти и при $f/a \approx 0,1$ (точка А) достигает значений, в два раза превышающих первоначальное. При высоте набора $h=100$ мм максимальное падение момента сопротивления составляет порядка 8-9% от первоначального при $f/a \approx 0,05$, после чего увеличение стрелки прогиба пластины ведет к резкому увеличению момента сопротивления балки, и при прогибе $f/a \approx 0,2$ увеличение момента сопротивления происходит также почти в два раза по сравнению с первоначальными значениями. Подобные закономерности изменения момента сопротивления наблюдаются и при высоте набора $h=150$ мм, где максимальное его падение составляет порядка 10% при относительной стрелке прогиба примерно $f/a \approx 0,09$, после чего также наступает монотонный рост момента сопротивления балки, и при относительной стрелке прогиба $f/a = 0,25$ он увеличивается по сравнению с первоначальным значением на 60% (точка В). Аналогичная закономерность наблюдается у балок с высотой набора $h=200$ мм. При увеличении стрелок прогиба от гофрировки момент сопротивления балки падает на 10-12% при прогибе $f/a \approx 0,12$, после чего также наступает зона роста момента сопротивления до 15% (точка С) при прогибе обшивки $f/a \approx 0,25$.

Рассмотренные закономерности изменения моментов сопротивления балок набора показы-

вают, что гофрировка оказывает положительное влияние, существенно увеличивая момент сопротивления балок набора.

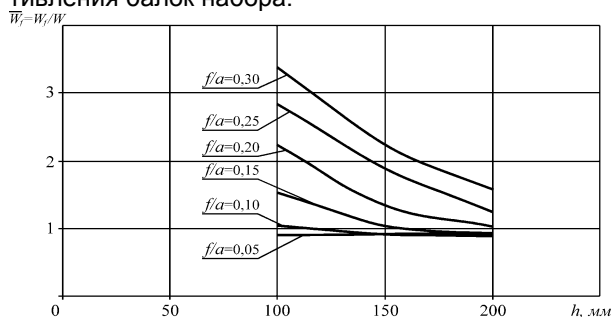


Рис. 3. Изменение момента сопротивления балки набора в зависимости от ее высоты

На рис. 3 представлено изменение момента сопротивления балки с присоединенным пояском в зависимости от высоты набора для различной величины гофрировки. Видно, что с уменьшением высоты набора влияние гофрировки обшивки на момент сопротивления балки становится более существенным.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что погиби обшивки оказывают существенное влияние на момент сопротивления шпангоутов, что необходимо учитывать при оценке технического состояния судовых корпусных конструкций.

Это увеличение в большинстве случаев существенно перекрывает падение момента сопротивления балок набора, обусловленное износом их элементов. Рассмотрим этот вопрос подробнее. На рис. 4 представлены закономерности изменения момента сопротивления балки с гофрированной обшивкой с учетом различной степени износа наружной обшивки корпуса.

Видно, что максимальное падение момента сопротивления балки составляет примерно 20% при относительном прогибе $f/a \approx 0,13$ и износе присоединенного пояса 40%, но уже при стрелке прогиба $f/a \approx 0,25$ (точка D) момент сопротивления увеличивается на величину более 10%, т.е. отрицательное влияние износа частично компенсируется влиянием погиби обшивки на момент сопротивления балки. Для балок с набором ниже $h=200$ мм это влияние еще более ощутимое.

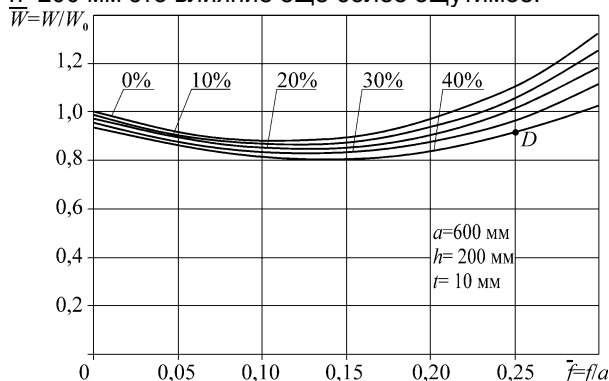


Рис. 4. Влияние износа обшивки на момент сопротивления балки

На рис. 5 показано изменение момента сопротивления балки с гофрированной обшивкой с учетом износа стенки набора. Видно, что максимальное падение момента сопротивления балок составляет примерно 25% при относительных прогибах наружной обшивки $f/a=0,1$ и максимальной норме износа стенки 40%, но уже при относительной стрелке прогиба $f/a=0,25$ момент сопротивления балки полностью восстанавливается за счет погиби наружной обшивки.

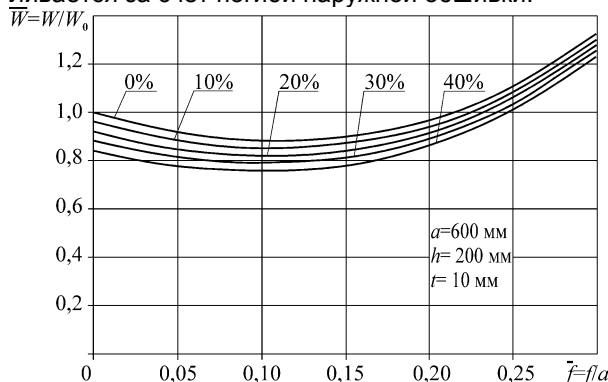


Рис. 5. Влияние износа стенки балки набора на ее момент сопротивления

Аналогичные закономерности наблюдаются и при износе свободного пояса набора, что представлено на рис. 6.

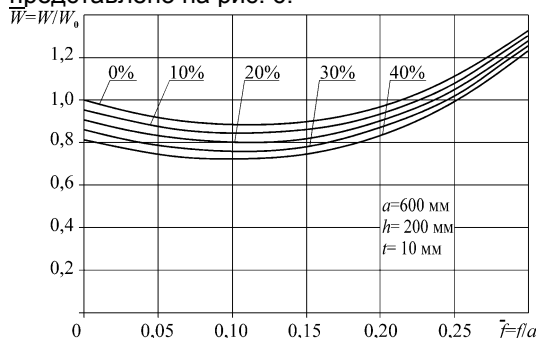


Рис. 6. Влияние износа свободного пояса балки набора на ее момент сопротивления

Представляет определенный интерес изменение момента сопротивления балок набора с гофрировкой присоединенного пояса при одновременном износе присоединенного пояса, свободного пояса и стенки набора. Результаты этих исследований представлены на рис. 7. Видно, что при максимальном износе элементов набора 40% падение момента сопротивления составляет почти 50% при гофрировке $f/a=0,1$, однако при стрелке прогиба $f/a=0,25$ это падение составляет всего 30% (точка E). При общем износе связей на 20% максимальное падение момента сопротивления составляет 30% при $f/a=0,1$, но уже при прогибе $f/a=0,25$ это падение составляет всего 10% (точка K).

Приведенный анализ свидетельствует, что погиби наружной обшивки весьма существенно влияют на момент сопротивления балок, увели-

чивая его. Исследования выполнялись для балок набора высотой $h=200$ мм, для балок с меньшей высотой эти положительные эффекты будут еще более существенными.

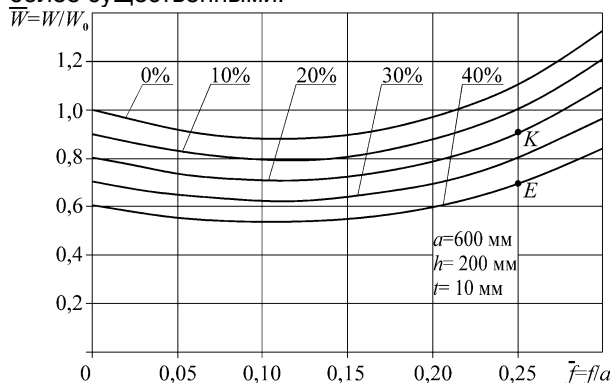


Рис. 7. Влияние износа всех элементов балки набора на ее момент сопротивления

Пренебрежение этими закономерностями ведет в большинстве случаев к замене еще вполне работоспособных конструкций, увеличивая тем самым объемы ремонта, а соответственно и сроки простоя судов в ремонте, снижая эффективность их эксплуатации.

В большинстве случаев износ обшивки существенно превышает износ остальных элементов набора. Рассмотрим возможную схему оценки технического состояния, представленную на рис. 8, аналогичном рис. 4, где представлено изменение момента сопротивления балок набора при деформированной наружной обшивке с учетом износа присоединенного пояска для набора высотой $h=100$ мм.

Существующий подход [2] в оценке изменения момента сопротивления балки набора (без учета погибей обшивки при $f/a = 0$) показывает, что даже при максимальном износе присоединенного пояска, равном 40%, момент сопротивления балки падает всего на 7%. В то же время при учете гофрировки обшивки момент сопротивления балок изменяется в диапазоне от $\bar{W} = 0,82$ при $f/a = 0,06$ до $\bar{W} = 1,6$ при $f/a = 0,25$.

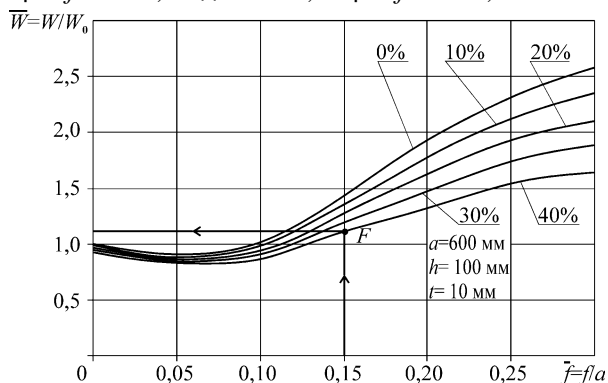


Рис. 8. Влияние износа обшивки на момент сопротивления балки высотой 100 мм

Приведенный пример показывает, что игнорирование погибей обшивки при оценке техниче-

ского состояния не дает объективной оценки степени опасности дефекта (в данном случае – износа наружной обшивки). Учет погибей в задачах оценки технического состояния может быть реализован по схеме, представленной на рис. 8. Зная стрелку прогиба обшивки, например $\bar{f} = 0,15$, восстановим перпендикуляр до пересечения с кривой изменения момента сопротивления балки с соответствующим износом, например 40%, и получим точку F. Горизонтальная линия, проведенная через точку F до пересечения с осью ординат дает нам искомое значение момента сопротивления балки набора.

На рис. 8 представлены графики изменения момента сопротивления балок набора в зависимости от погибей наружной обшивки с учетом износа ее наружной обшивки. Подобные графики могут быть построены и с учетом износов свободного пояска и стенки набора.

3. Нормирование параметров эксплуатационных дефектов

Приведенный выше анализ изменения моментов сопротивления балок набора в зависимости от относительных стрелок прогибов пластин обшивки \bar{f} осуществлен в ряде случаев при прогибах, выходящих за нормативные ограничения прогибов при гофрировке, т.е. все положительные влияния погибей обшивки отсекаются нормативными ограничениями в соответствии с [2].

Здесь в очередной раз встает вопрос о корректности сформулированных в [2] нормативных ограничениях, на что неоднократно уже обращалось внимание, например в [1], где указывалось, что детерминированное нормирование параметров эксплуатационных дефектов не отражает степень опасности дефекта и зачастую приводит к необоснованным завышения объемов ремонта. Поэтому перспективной является разработка нормативов на параметры эксплуатационных дефектов с использованием вероятностных критериев.

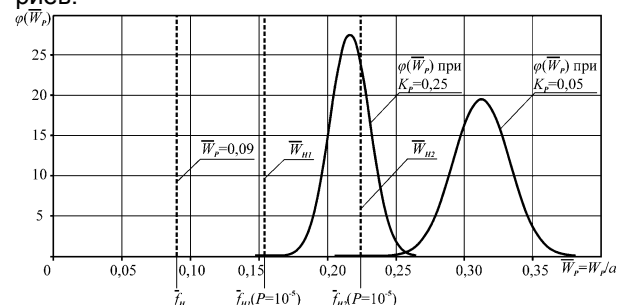


Рис. 9. Схема нормирования стрелок прогиба пластин при гофрировке с использованием вероятностных подходов

Суть вероятностной схемы нормирования гофрировки показана на рис. 9, где представлена плотность распределения разрушающих стрелок прогиба пластин, полученная при проведении серии экспериментов по разрушению пластин в практическом диапазоне изменения их распорной

жесткости $K_p = 0,13 - 0,28$, где W_p – разрушающая стрелка прогиба пластин, a – поперечная шпация перекрытия. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что фактические опасные стрелки прогиба у пластин с развитой гофрировкой больше, чем у пластин без гофрировки, имеющих существенно больший распор.

Плотность распределения разрушающих стрелок прогиба в практическом диапазоне изменения коэффициента распора может быть представлена формулой [3, 4]

$$\phi(\bar{W}_p) = \frac{1}{(0,022 - 0,3 \cdot K_p) \cdot \sqrt{2\pi}} \times \exp \left(- \frac{\left\{ \bar{W}_p - (1,8 \cdot K_p^2 - 0,81 \cdot K_p + 0,41) \cdot \sin^{1,8} \left[\frac{\pi}{4} \cdot (2,5 + 1,25 \cdot K_p) \right] \right\}^2}{2 \cdot (0,022 - 0,3 \cdot K_p)^2} \right) \quad (2)$$

где $\bar{W}_p = W_p / a$ – разрушающая стрелка прогиба пластины;

a – шпация.

На рис. 9 представлена возможная схема реализации вероятностных принципов нормирования стрелок прогиба при гофрировке, где по оси абсцисс отложены нормативные стрелки прогиба. Так, при $\bar{f}_H = 0,09$ указана нормативная стрелка прогиба, регламентируемая Российским морским регистром судоходства [2]. Здесь же, при относительно малых прогибах пластин, когда коэффициент их распора при локальном нагружении перекрытия составляет порядка $K_p = 0,25$ мы можем предложить другую нормативную стрелку прогиба $\bar{f}_{H1} = 0,155$ при обеспечении 10^{-5} . В том случае, если мы имеем развитую гофрировку, хотя бы на уровне \bar{f}_H , то коэффициент распора пластин при их локальном нагружении будет резко снижаться и, например, при $K_p = 0,05$ нормативная стрелка прогиба при той же самой обеспеченности 10^{-5} составляет $\bar{f}_{H2} = 0,225$, т.е. существенно больше \bar{f}_H , определяемой [2].

Заключение

Использование вероятностных принципов нормирования не только вскроет дополнительные резервы прочности как пластин, так и набора, где пластины входят в состав балки в качестве присоединенного пояса, но и позволит существенно сократить объемы ремонта корпусов судов

. итература

1. Бураковский, Е.П. Совершенствование нормирования параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов / Е.П. Бураковский. – Калининград: КГТУ, 2005. – 339 с.
2. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации / Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб.: РМРС, 2014. – 350 с.
3. Бураковский, П.Е. Резервы прочности пластически деформированной бортовой обшивки судов / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2012. – Вып. 67(351). – С. 35–40.
4. Бураковский, П.Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации / П.Е. Бураковский. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – 298 с.

References

1. Burakovskiy E.P. Sovershenstvovanie normirovaniya parametrov ekspluatatsionnykh defektov korpusov sudov. Kaliningrad, 2005, 339 p.
2. Pravila klassifikatsionnykh osvidetel'stvovaniy sudov v ekspluatatsii. Rossiyskiy Morskoy Registr Sudo-khodstva. Saint-Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2014. – 350 p.
3. Burakovskiy P.E. Rezervy prochnosti plasticheski deformirovannoy bortovoy obshivki sudov (2012). Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta imeni akad. A.N. Krylova, issue 67(351), pp. 35–40.
4. Burakovskiy P.E. Obespechenie prochnosti korpusnykh konstruksiy sudov v protsesse ekspluatatsii. Kaliningrad, 2015, 298 p.

УДК 629.5.015.4:629.5.015.2

СЦЕНАРИИ ГИБЕЛИ НЕФТЕ-РУДОВОЗА MV «DERBYSHIRE»**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

В 1980 году у берегов Японии погибло одно из самых больших судов в мире – MV «Derbyshire». В настоящей статье предложены три сценария гибели MV «Derbyshire», учитывающие особенности взаимодействия судна с внешней средой в условиях шторма. Первый сценарий связан с последовательным затоплением трюмов судна при разрушении люковых закрытий под действием волн. После заполнения первого трюма волна, заходящая на палубу, разрушает крышку люка второго трюма и начинается затопление второго, пустого трюма и т.д. по принципу «домино» до тех пор, пока не затопит количество трюмов, достаточное для потери плавучести судном. Второй сценарий связан с захватом волной носовой оконечности, в результате чего палуба судна оказывается под действием значительных гидродинамических усилий. Эти усилия могут привести к недопустимому росту напряжений в корпусе судна и его разрушению. Третий сценарий предполагает потерю остойчивости судном при захвате волной носовой оконечности. При этом происходит опрокидывание судна и его разворот, в результате чего на надстройку действуют значительные гидродинамические усилия, приводящие к ее отрыву. Этот сценарий гибели судна MV «Derbyshire» является наиболее правдоподобным. Таким образом, основной причиной гибели MV «Derbyshire» является не низкая прочность люковых закрытий, а плоская палуба в носовой оконечности судна, что позволило развиваться на ее поверхности большой гидродинамической силе, которая привела к захвату носовой оконечности судна с последующим обнулением метацентрической высоты и переворотом судна.

Ключевые слова: штормовые условия, гибель судна, MV «Derbyshire», захват волной, гидродинамические нагрузки, разрушение корпуса, опрокидывание, люковые закрытия

**SCENARIOS OF THE LOSS OF ORE-BULK-OIL CARRIER
MV «DERBYSHIRE»****Evgeny 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 Burakovskiy

Ph. D.,
Ass. professor of department of marine safety
Kaliningrad state technical university
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Abstract

In 1980, one of the biggest ships in the world - MV «Derbyshire» was lost off the coast of Japan. This paper proposes three scenarios for the sinking of MV «Derbyshire», inclusive of the ship's behaviour in storm conditions. The first scenario is associated with gradual flooding of the holds after the hatch covers have been damaged by waves. After flooding of the first hold, waves destroy a hatch cover of the second hold and the second hold is filled with water, and then it continues "on the principle of domino" until most part of the holds are flooded and the buoyance of the ship is lost. The second

scenario is related to the wave run-up of the bow, causing the ship deck to be under the influence of significant hydrodynamic forces. These forces may result in an exorbitant stress increase in the hull and its following destruction. The third scenario involves stability loss because of wave run-up of the bow. Thus there happens capsizing and turning of the ship, as a result of which the island is under strong hydrodynamic forces, leading to its break-off. This scenario of MV «Derbyshire» sinking is the most plausible. Thus, the main cause of the loss of MV «Derbyshire» is not a low strength of hatch covers, but rather flat deck at the bow, which allowed developing of large hydrodynamic force, which led to the wave run-up of the ship's bow, followed by zeroing of metacentric height and overturn of the ship.

Key words: storm conditions, loss of the ship, MV «Derbyshire», wave run-up, hydrodynamic loads, destruction of the hull, capsizing, hatch covers

Введение

В 1980 году около берегов Японии разыгралась трагедия, в результате которой погибло одно из самых больших судов в мире MV «Derbyshire». Оно относилось к классу Bridge-class combination carrier (длина $L=294,2$ м, ширина $B=44,3$ м, осадка $T=18,44$ м, высота борта $H=25$ м, ледовый класс A1) MV «Derbyshire» и было построено в 1976 г (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид нефте-рудовоза MV «Derbyshire»

До сих пор выходят статьи, посвященные анализу причин, повлекших за собой эту трагедию [7-10]. В частности, авторами отмечались серьезные конструктивные недостатки при проектировании и постройке судна в районе 65 шпангоута, т.е. в сечении корпуса непосредственно перед надстройкой. Обнаружилось также, что прочность люковых закрытий была недостаточной, чтобы выдерживать волновые нагрузки даже порядка 30-40 кПа, что по мнению исследователей и явилось главной причиной гибели судна. Обращает на себя внимание также время развития аварии и гибели судна, по данным [10] всего две минуты. Затонувший MV «Derbyshire» был найден в Японском море на глубине 4 км с оторванной надстройкой, которая территориально находилась рядом с основным корпусом. Это исходная информация для анализа причин гибели MV «Derbyshire».

1. Первый сценарий

Как уже сообщалось, основной причиной гибели посчитали недостаточную прочность люковых закрытий, что позволило осуществить после-

довательно, один за другим затопление всех трюмов «по принципу домино». Итак, в варианте загрузки судна, представленном на рис. 2, величина надводного борта была 9 м.

У берегов Японии судно попало в сильный шторм, где высоты волн достигали величины 12 м [7, 9]. В этом случае, как это показано на рис. 2, волна превышает высоту надводного борта на 3 м. Так как крышки люков не выдерживают давления трех метров водяного столба, то они будут раздавлены и начнется заполнение водой первого трюма до высоты комингса люка. При этом пока первый трюм не заполнится крышка люка второго (пустого) трюма останется целой, потому что любая заходящая на палубу волна будет проваливаться в первый (загруженный) трюм. После заполнения первого трюма волна, заходящая на палубу, разрушает крышку люка второго трюма и начинается затопление второго, пустого трюма и т.д. по принципу «домино» до тех пор, пока не затопит количество трюмов, достаточное для потери плавучести судном. Следует заметить, что в этом случае имея девятиметровый надводный борт даже при затоплении первых трех трюмов нос судна не уйдет под воду, а судно получит только дифферент на нос (рис. 3), из-за чего при качке палуба будет заливаться водой еще больше, что приведет к увеличению угла дифферента с ψ до ψ_1 при котором носовая оконечность периодически погружаясь под воду начнет пропускать волны не трехметровой, а существенно большей высоты.

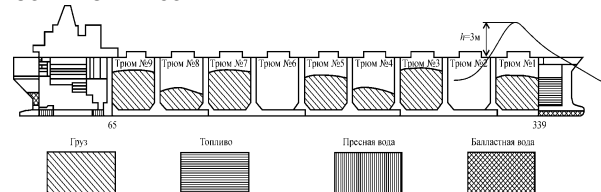


Рис. 2. Схема загрузки судна

Наличие притопленной носовой оконечности судна при широкой палубе создает условия возникновения прибойной волны (рис. 3б), при которой высота волны начинает резко возрастать, фронт становится крутым, а тыловая часть пологой.

Оценим время затопления второго (пустого) трюма водой при условии, что высоты волн превышают палубу на 3 м. При площади люкового закрытия, составляющей 30 % от площади трюма, и высоте борта 25 м понадобится порядка

25 волн. При длине волны λ равной длине судна ее скорость c будет определяться по формуле:

$$c = 1.25\sqrt{\lambda} \approx 20 \text{ м/с}. \quad (1)$$

При такой скорости волна проходит по корпусу за 15 секунд, не учитывая скорость хода судна. Отсюда нетрудно оценить, что только для затопления второго (пустого) трюма понадобится порядка $T=375$ секунд, т.е. больше шести минут. При затоплении же хотя бы четырех трюмов, с учетом расположения в них груза, понадобится около 15 минут, при этом судно будет еще находиться на плаву.

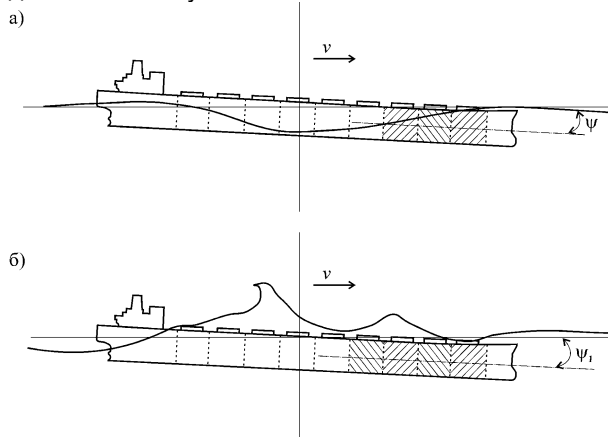


Рис. 3. MV «Derbyshire» на волнении

Несостоятельность этого сценария заключается в том, что для его реализации необходимо слишком много времени. Кроме того, затопление первого от носовой оконечности трюма, и даже первого и третьего при исходной высоте надводного борта в грузу 9 метров не позволяет заглубить носовую оконечность таким образом, чтобы палуба была под водой, а, следовательно, и реализовать быстрое затопление остальных трюмов «по принципу домино» [10]. Рассмотрим другие сценарии гибели MV «Derbyshire», которые были разработаны авторами при анализе причин гибели российского танкера «Находка»

В 1997 году у берегов Японии погиб российский танкер «Находка», попавший в сильный шторм. Суть сценария гибели танкера «Находка» связана с захватом волной носовой оконечности судна [1-5]. Такой сценарий может быть реализован практически на любом судне, имеющем плоские или близкие к ним очертания палубы в носовой оконечности.

Суть сценария гибели судна выглядит следующим образом. На волнении с длиной волны приблизительно равной длине корпуса судна происходит раскачивание судна таким образом, что носовая оконечность начинает входить под воду, таким образом, что от 1/3 до 1/4 длины корпуса оказывается под водой. Следует заметить, что такая кинематика корпуса судна была получена японскими исследователями [11, 12] при расследовании гибели танкера «Находка». Погрузившись в воду (рис. 4), носовая оконечность корпуса судна начинает обтекаться водой как в вертикальном, так и в горизонтальном направле-

нии [1-3], при этом создаются определенные гидродинамические силы давления, приложенные к палубе. В результате воздействия этих сил корпус начинает погружаться в воду и деформироваться, при этом возникает экстремальное значение изгибающего момента примерно на 1/3 длины корпуса от носовой оконечности. При определенной загрузке корпуса одновременно с носовым экстремумом может появиться экстремум изгибающего момента в корме, который обусловлен некоторым выходом кормовой оконечности судна из воды.

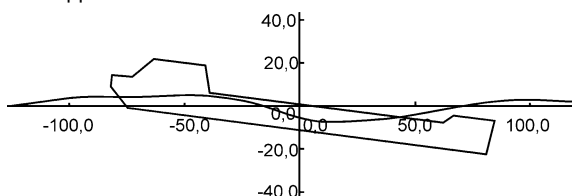


Рис. 4. Погружение носовой оконечности танкера «Находка» в воду на волнении

Следует заметить, что при этом возникают очень сложные гидродинамические проблемы, связанные как с обтеканием носовой оконечности в потоке воды, так и с резким падением метацентрической высоты и, соответственно, нарушением устойчивости судна, что отмечено в работе [3].

Сценарий гибели танкера «Находка», связанный с захватом волной носовой оконечности судна, применим к описанию возможных вариантов гибели MV «Derbyshire».

2. Второй сценарий

Допустим, что MV «Derbyshire» был раскачан на волнении таким образом, что его носовая оконечность попадала под удар волны сверху по палубе в носовой оконечности судна, как это представлено на рис. 4. Не располагая точными данными для расчета MV «Derbyshire» приведем приближенный анализ развития событий.

Следует отметить, что захват носовой оконечности MV «Derbyshire» может произойти при условии, что гидродинамическая сила, прилагаемая к палубе, выдерживается палубными конструкциями, что в рассматриваемом случае не реализуется, т.к. крышки люковых закрытий не держат давление даже трех метров водяного столба. Крышки, разрушаясь, сбрасывают давление, поэтому пока трюма носовой группы (3-4 трюма) не заполнятся водой, гидродинамическая сила не разовьется в полном объеме. Оценим время затопления трюмов в носовой оконечности в этом случае. Учитывая пакетную структуру волн, можно предположить, что судно подвергалось серии ударов волн по носовой оконечности сверху высотой 10-12 метров. Учитывая, что площадь люковых закрытий составляет примерно 30% от площади трюма, то для заполнения пустого трюма понадобится всего 5-6 волн высотой 12 метров. Для загруженных трюмов количество волн еще меньше. Учитывая, что захват волной

носовой оконечности по схеме, представленной на рис. 4, происходит затопление сразу трех-четырех трюмов одновременно, поэтому максимальное время затопления трех-четырех трюмов определяется затоплением лишь одного пустого трюма №2.

Зная, что скорость волн связана с длиной зависимостью (1), нетрудно определить, что время развития аварии во втором сценарии составляет всего 65-90 секунд.

Таким образом, после затопления первых трех трюмов, т.е. всего через 90 секунд при ударе следующей волны на палубе в носовой оконечности развивается гидродинамическая сила большой величины (рис. 5).

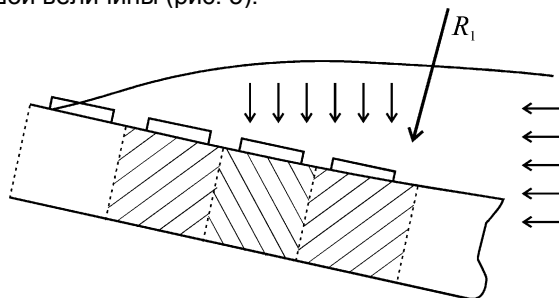


Рис. 5. Гидродинамическая нагрузка на носовую оконечность

Определим величины изгибающих моментов в корпусе судна при захвате волной его носовой оконечности. Представим корпус судна как балку, лежащую на упругом основании. При сильном погружении носовой оконечности судна выходит из воды его кормовая часть. Отбрасывая погруженную носовую часть и вышедшую из воды кормовую оконечность, и заменяя их действие эквивалентными силами и моментами, приходим к расчетной схеме, представленной на рис. 6.

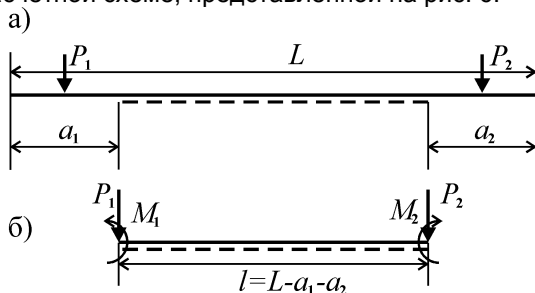


Рис. 6. Расчетная схема корпуса судна на второй стадии развития процесса захвата волной носовой оконечности

Для упрощения расчетного анализа будем считать, что жесткость корпуса по длине постоянна, тогда дифференциальное уравнение изгиба корпуса как балки на упругом основании имеет вид:

$$EI \frac{d^4 w(z)}{dz^4} + k \cdot w(z) = q(z), \quad (2)$$

где EI – жесткость корпуса по отношению к изгибу; k – коэффициент жесткости упругого основания; $q(z)$ – интенсивность внешней распределен-

ной нагрузки. В рассматриваемом случае решение уравнения можно представить следующим образом:

$$w(z) = D_0 \cdot V_0(\alpha \cdot z) + D_1 \cdot V_1(\alpha \cdot z) + D_2 \cdot V_2(\alpha \cdot z) + D_3 \cdot V_3(\alpha \cdot z) \quad (3)$$

где D_0, D_1, D_2, D_3 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий; $V_0(\alpha \cdot z), V_1(\alpha \cdot z), V_2(\alpha \cdot z), V_3(\alpha \cdot z)$ – функции

Н.П. Пузыревского; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$ [6].

После нахождения постоянных интегрирования изгибающий момент в корпусе судна может быть определен по выражению

$$M(z) = \frac{d^2 w(z)}{dz^2} \cdot EI. \quad (4)$$

Варьируя значениями нагрузки P_2, M_2, P_1 и M_1 получим эпюры изгибающего момента (рис. 7).

Анализ эпюры, представленной на рис. 7, показывает четко выраженный экстремум дополнительного изгибающего момента в носовой части судна. Величина дополнительного изгибающего момента в носовой оконечности в сумме с другими компонентами изгибающих моментов $M_{sw} + M_w$ оказалась недостаточной для разрушения корпуса судна (здесь M_{sw} – момент на тихой воде, M_w – волновой изгибающий момент). При этом в кормовой части судна на этом этапе нагружения корпуса судна изгибающий момент достаточно малый, что также не достаточно для разрушения корпуса.

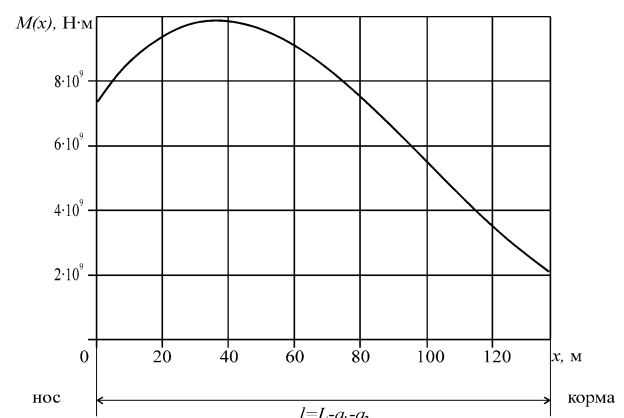


Рис. 7. Дополнительный изгибающий момент при захвате волной носовой оконечности

Рассмотрение этого сценария показывает, что на этапе захвата волной носовой оконечности MV «Derbyshire» волной никаких серьезных разрушений корпуса не происходит.

3. Третий сценарий

После первого удара волны и разрушения 3-4 крышек трюмов с последующим их затоплением

в течении 75-90 секунд при ударах по носовой оконечности 4-5 волн высотой 10-12 метров судно получило дифферент на нос. Так же, как и в сценарии №2, после затопления трех трюмов возникают условия для развития гидродинамической силы на палубе в носовой оконечности судна, поэтому последующий удар двенадцатиметровой волны по палубе в носовой оконечности судна приводит к тому, что судно зарывается носом в воду на глубину порядка 30-40 метров. При этом положении корпуса судна и наличии давления на палубу в носовой оконечности оно теряет поперечную остойчивость, т.к. метацентрическая высота резко падает вплоть до нулевых значений. А так как обтекание палубы нестационарное, поток воды может накренить корпус, в результате чего судно начинает переворачиваться, с одновременным разворотом лагом к волне. При опрокидывании судна с последующим его разворотом надстройка будет двигаться в потоке воды. Анализ показывает, что угловые скорости при развороте перевернутого судна лагом к волне почти на два порядка выше угловых скоростей судна на циркуляции.

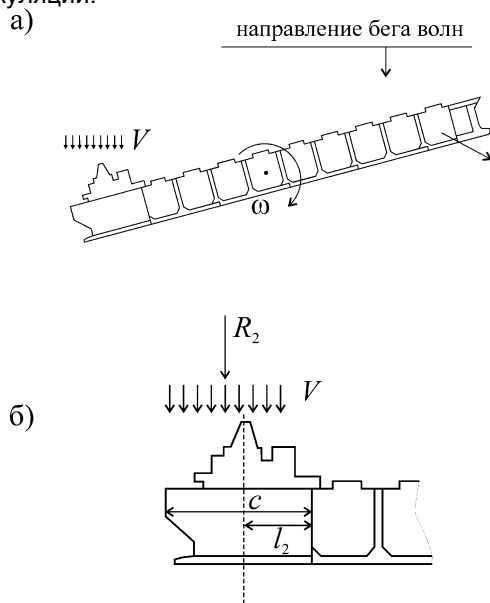


Рис. 8. Схема нагрузки на надстройку при развороте опрокинутого корпуса MV «Derbyshire»: а) – схема разворота корпуса судна; б) – схема действия усилий на кормовую оконечность

При таких больших скоростях давление на надстройку может оказаться чрезвычайно большим, что создает момент M'_2 , достаточный для разлома судна по 65 шпангоуту

$$M'_2 = R_2 \cdot l_2, \quad (5)$$

где R_2 – равнодействующая сил давления; l_2 – плечо равнодействующей сил давления относительно сечения по шпангоуту №65.

Этому также способствуют конструктивные недостатки в данном районе корпуса.

Результаты приближенной оценки показывают, что напряжения, создаваемые моментом M'_2 в сечении по шпангоуту №65 находятся на уровне предела текучести, чего вполне достаточно для разрушения корпуса в этом сечении и отрыва надстройки. Оторванная надстройка перед этапом затопления MV «Derbyshire» соединялась с основной частью корпуса только днищевой обшивкой, которая в процессе падения судна в глубину была оторвана и упала недалеко от основной части корпуса.

Заключение

Таким образом, последний сценарий гибели судна MV «Derbyshire» является наиболее правдоподобным. Он укладывается по времени в две минуты. В результате анализа возможных вариантов развития катастрофы можно сделать главный вывод, что основной причиной гибели MV «Derbyshire» является не низкая прочность люковых закрытий, а плоская палуба в носовой оконечности судна, что позволило развиваться на ее поверхности большой гидродинамической силе, которая привела к захвату носовой оконечности судна с последующим обнулением метацентрической высоты и переворотом судна. Следует заметить, что в момент переворота судна все люковые закрытия, за исключением люковых закрытий на первых четырех трюмах, были, видимо, целыми, т.к. «принцип домино» не успел реализоваться.

Рассмотрение этой катастрофы позволяет сделать еще очень важный вывод о том, что в случае наличия на MV «Derbyshire» прочных крышек люков авария развилась бы еще быстрее, всего за 20-30 секунд, т.е. от удара всего одной волны высотой порядка 12 метров.

Вывод: главной причиной гибели судна является плоская палуба в носовой оконечности, способствующая развитию гидродинамических сил. Схема воздействия гидродинамических сил при опрокидывании судна в процессе захвата его носовой оконечности волной описана в [1, 2]. Наличие же слабых люковых закрытий лишь увеличило время развития до двух минут, т.к. в противном случае MV «Derbyshire» мог погибнуть от удара по носовой оконечности палубы всего одной волны.

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, П.Е. Моделирование сценария развития чрезвычайной ситуации, связанной с разрушением корпуса танкера «Находка» / П.Е. Бураковский // Балтийский морской форум: Тезисы докладов. – Т. 2. – Калининград: изд-во БГАРФ, 2013. – С.172–177.
5. 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.
6. Папкович, П.Ф. Труды по строительной механике корабля. В 4 т. Т.1. Изгиб балок и прямолинейных рам / П.Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 576 с.
7. Hirdaris, S.E. Two- and three-dimensional hydroelastic modeling of a bulker in regular waves / S.E. Hirdaris, W.G. Price, P. Temarel // Marine Structures. – 2003. – №16. – P. 627–658.
8. Paik, J.K. Reassessment of the M.V. Derbyshire sinking with the focus on hull-girder collapse / J.K. Paik, D. Faulkner // Marine Technology. – 2003. – Vol. 40. – № 4. – P. 258–269.
9. Paik, J.K. Ultimate Limit State Assessment of the M.V. Derbyshire Hull Structure / J.K. Paik, J.K. Seo, B.J. Kim // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2008. – Vol. 130. – Issue 2. – P. 021002-1-021002-9.
10. Scott, W. The Sinking of the Ore Carrier MV Derbyshire / W. Scott. – Режим доступа: <http://www.brighthubengineering.com/marine-history/114509-the-sinking-of-the-ore-carrier-mv-derbyshire>.
11. 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.
12. 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., Prokhnic V.P. (2013). Problemy kontrolya dinamiki sudna v ekstremal'nykh situatsiyakh na osnove metodov sovremennoy teorii katastrof. Morskoy vestnik, №1(45), pp.89–95.
2. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Nechaev Yu.I., Prokhnic V.P. (2013). Upravlenie i prinyatie resheniy pri kontrole ekspluatatsionnoy prochnosti sudna na osnove sovremennoy teorii katastrof. 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. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, issue 82(366), pp. 21–30.
4. Burakovskiy P.E. Modelirovanie stseneriya razvitiya chrezvychaynoy situatsii, svyazannoy s razrusheniem korpusa tankera «Nakhodka». Baltiyskiy morskoy forum. Kaliningrad, BGARF, 2013, pp.172–177.
5. Burakovskiy P.E. Modelirovanie chrezvychaynoy situatsii, svyazannoy s «zakhvatom» volnoy nosovoy okonechnosti sudna. Materialy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitel'noy mekhanike i sovremenym prikladnym programmam i sistemam (VMSPPS'2013). Moscow, MAI, 2013, pp. 298–300.
6. Papkovich P.F. Trudy po stroitel'noy mekhanike korablya. V 4 t. T.1. Izgib balok i pryamolineynykh ram. Leningrad, 1962, 576 p.
7. Hirdaris S.E., Price W.G., Temarel P. (2003). Two- and three-dimensional hydroelastic modeling of a bulker in regular waves. Marine Structures, №16, pp. 627–658.
8. Paik J.K., Faulkner D. (2003). Reassessment of the M.V. Derbyshire sinking with the focus on hull-girder collapse. Marine Technology, Vol. 40, № 4, pp. 258–269.
9. Paik J.K., Seo J.K., Kim B.J. (2008). Ultimate Limit State Assessment of the M.V. Derbyshire Hull Structure. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 130, Issue 2, pp. 021002-1-021002-9.
10. Scott W. The Sinking of the Ore Carrier MV Derbyshire. <http://www.brighthubengineering.com/marine-history/114509-the-sinking-of-the-ore-carrier-mv-derbyshire>.
11. 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.
12. 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.

УДК 656.61.052

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ 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 Дмитровский

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

Столкновения судов являются одним из наиболее распространенных видов аварий на судах мирового флота. В настоящей работе сформулирована новая математическая модель таких происшествий для случая, когда одно судно (называемое нашим) движется параллельно с потоком прочих судов – встречных и попутных. Наиболее важными характеристиками судов в потоке являются их скорости и ширины. Хотя они являются случайными величинами с точки зрения команды нашего судна, они неизменны во времени для каждого конкретного судна в потоке. С целью упрощения анализа рассматривается только неуправляемая модель, когда экипаж не предпринимает никаких действий для предотвращения столкновения. Таким образом, в представленной модели не рассматривается человеческий фактор, который не может быть удовлетворительно описан путем математического моделирования. При весьма общих условиях для потока прочих судов (которые образуют случайное пуассоновское поле) получена формула для оценки вероятности безаварийного плавания нашего судна за определенный период T . Представляется интересным, что указанная вероятность не зависит от распределений ширин и скоростей прочих судов, а лишь от их математических ожиданий.

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

MATHEMATICAL MODEL OF COLLISION OF VESSELS DRIVEN BY PARALLEL COURSES

Evgeny 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 Burakovskiy

Ph. D.,
Ass. professor of department of marine safety
Kaliningrad state technical university
Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: paul_b@mail.ru

Vladimir Dmitrovskiy

Ph. D.,
Chief specialist in software architecture
Kaliningrad state technical university

Sovetskiy prospekt, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail vdmistrovsky@mail.ru

Abstract

Ships collisions are the most common type of accidents for the world's fleet. The present work formulates new mathematical model of such accidents for a case when one ship (our) goes in parallel with the stream of other ships in the same or opposite directions. As the most influencing characteristics of ship's stream are considered their widths and velocities. Although either are random variables, they proposed to be constant through the whole dedicated period T . That is, they are random variables for our crew, but are constant for every other ship's one. Simplifying situation, it is considered only "unmanned" case when no crew does anything to avoid collision. As such, presented model does not handle "human factor" that can not be modeled mathematically in any reasonable way. Under very loose conditions on the other ships stream (it is supposed to be the Poisson random field) it is obtained for our ship the probability of safety in dedicated period T . It is interesting that this probability does not depend on distributions of other ship's velocities and widths, but on their mathematical expectations only.

Key words: mathematical model, 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 риск возникновения таких происшествий. В работах [2, 5] была предложена вероятностная модель движения судов встречными курсами. В работе [3] была рассмотрена задача перпендикулярного пересечения судном фарватера с интенсивным судоходством. К сожалению, модели этих работ сильно различаются, что не позволяет сформулировать единую модель произвольного движения судов. В настоящей работе предлагается модель, аналогичная модели работы [3], но для случая движения судов параллельными курсами (во встречном и попутном направлении). Эта модель в дальнейшем станет единым базисом для оценки опасности столкновения судов, движущихся в произвольных направлениях.

1. Модель потока судов

Весь анализ будет проводиться с точки зрения одного судна, которое мы для простоты будем называть просто «нашим». При этом остальные суда будут двигаться либо навстречу нашему судну (рис. 1), либо в одном направлении с ним (рис. 2). Таким образом, по отношению к нашему судну они будут образовывать два потока судов: встречный и попутный.

Рассмотрим на первом этапе движение нашего судна в потоке встречных судов (рис. 1). Все остальные суда будем называть «прочими» или «встречными». Если нам потребуется проанализировать поведение какого-либо одного встречного судна, будем называть его «выделенным».

Под судном в нашей модели будет пониматься горизонтальный отрезок, ширина которого соответствует ширине судна. Для простоты будем называть R полушириной нашего судна, хотя на самом деле это – полуширина зоны опасно-

го сближения судов из-за эффекта «присасывания» [4] (на практике это примерно трёхкратная полуширина корпуса судна). Скорость нашего судна – V .

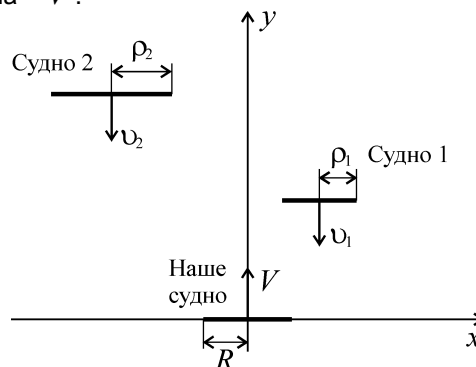


Рис. 1. Схема движения судна во встречном потоке судов

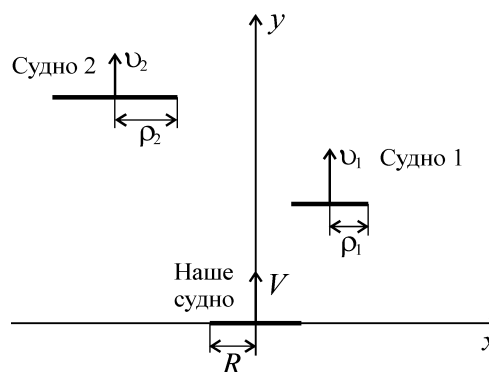


Рис. 2. Схема движения судна в попутном потоке судов

Случайную скорость встречных судов будем обозначать v , их случайную полуширину – ρ , а обе эти случайные величины в совокупности будем называть характеристиками судна. Обозначим их совместную функцию распределения $F_{v,\rho}(v, r)$, а частные функции распределения, учитывая, что $F_{v,\rho}(v, r) \equiv 0$ при $v < 0$ или при $r < 0$, так:

$$F_v(v) = \int_0^{\infty} F_{v,\rho}(v, dr), \overline{F}_v(v) = 1 - F_v(v), \quad (1)$$

$$F_\rho(r) = \int_0^{\infty} F_{v,\rho}(dv, r), \overline{F}_\rho(r) = 1 - F_\rho(r). \quad (2)$$

В случае если скорости судов не зависят от их ширин, $F_{v,\rho}(w, s) = F_v(w) * F_\rho(s)$.

Ширины всех судов, естественно, постоянны во времени. Этого же потребуем от их скоростей.

Потребуем существования математических ожиданий ширин и скоростей встречных судов:

$$M_\rho = \int_0^{\infty} r * F_\rho(dr) = \int_0^{\infty} \overline{F}_\rho(r) dr, \quad (3)$$

$$M_v = \int_0^{\infty} v * F_v(dv) = \int_0^{\infty} \overline{F}_v(v) dv. \quad (4)$$

Характеристики всех судов, включая наше, независимы в совокупности. Кроме этих характеристик, для каждого встречного судна нас будет интересовать производная характеристика $\sigma = v * \rho$. От неё так же потребуем существования математического ожидания:

$$M_\sigma = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} v * r * F_{v,\rho}(dv, dr). \quad (5)$$

В случае если скорости судов не зависят от их ширин, $M_\sigma = M_v * M_\rho$.

Вся акватория мирового океана в нашей модели будет представляться бесконечной плоскостью с декартовой системой координат, ось y ориентирована в направлении движения нашего судна, ось x перпендикулярна оси y (см. рис. 1). Встречные суда движутся параллельно оси y навстречу нашему.

Под координатами судна мы будем понимать координаты его центра. Под фразой «судно находится в ...» будет пониматься «координата судна находится в ...». Модель начинает функционировать в момент времени $t = 0$, когда наше судно находится в начале координат.

Предположим, что встречные суда образуют в акватории фарватера стационарное пуассоновское поле с интенсивностью I . Это означает, что в любой момент времени

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

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

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

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

Подчеркнём три важнейшие характеристики нашей модели потока судов:

1. Независимость. Количества судов в любых частях акватории фарватера независимы в совокупности, и не зависят от их характеристик.

2. Стационарность. Интенсивность потока встречных судов неизменна во времени. Хотя характеристики всех судов и случайны, они так же неизменны во времени.

3. Однородность. Интенсивность потока встречных судов, а так же функции распределения их характеристик, не зависят от их местонахождения в акватории.

2. Модель столкновения судов

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

Под столкновением встречного судна с нашим мы будем понимать наложение (хотя бы частичное) их отрезков при встрече (когда ординаты судов равны).

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 проникают 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 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 встречных судов 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 прочих судов”. Громоздкость формулы для этой условной вероятности сделает текст выкладок просто нечитаемым.

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

3. Вероятность столкновения с встречным судном

Положим теперь, что нам известно, что в момент времени $t=0$ в прямоугольной области акватории Π , для которой $-X \leq x \leq X$, $0 \leq y \leq Y$, где $X > R$, $Y > T \cdot V$, находится единственное судно (будем называть его выделенным). Площадь этого прямоугольника $S_{\Pi} = 2 \cdot X \cdot Y$. Ни координаты (ξ_1, ζ_1) , ни характеристики (v_1, ρ_1) выделенного судна нам не известны. Требуется найти вероятность $P_1(T, X, Y)$ того, что за время T произойдёт столкновение с ним нашего судна. Нижний индекс 1 этой вероятности означает, что это вероятность столкновения с одним судном.

Условием столкновения на координату ξ_1 является $|\xi_1| \leq \rho_1 + R$, так как если расстояние по оси x между центрами судов превышает сумму их полуширин, столкновение произойти не может.

Условием столкновения на координату ζ_1 является $\zeta_1 \leq T \cdot (V + v_1)$, так как иначе за время T суда не успеют сблизиться.

В силу пуассоновости поля судов координаты выделенного судна (ξ_1, ζ_1) есть двумерная случайная величина, равномерно распределённая в прямоугольнике Π [1]. Поэтому

$$P_1(T, X, Y) = S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left(\int_0^{\min(Y, T \cdot (V+v))} \left(\int_{-\min(X, R+r)}^{\min(X, R+r)} dx \right) dy \right) F_{v,\rho}(dv, dr) = \quad (6)$$

$$= 2 \cdot S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min(Y, T \cdot (V+v)) \cdot \min(X, R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr).$$

Если же в прямоугольнике Π 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

$$\overline{P}_N(T, X, Y) = \prod_{k=1}^N \overline{P}_1(T, X, Y) = (\overline{P}_1(T, X, Y))^N. \quad (7)$$

Теперь предположим, что нам не известно и количество судов, находящихся в указанном прямоугольнике, т.е. оно случайно. В силу пуассоно-

вости поля судов по формуле полной вероятности мы получаем следующую вероятность избежать столкновения с ними:

$$\overline{P}(T, X, Y) = \exp\{-I \cdot S_{\Pi}\} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(I \cdot S_{\Pi} \cdot \overline{P}_1(T, X, Y))^N}{N!} = \quad (8)$$

$$= \exp\{-I \cdot S_{\Pi} \cdot (1 - \overline{P}_1(T, X, Y))\} =$$

$$= \exp\{-I \cdot S_{\Pi} \cdot P_1(T, X, Y)\} =$$

$$= \exp\left\{-2 \cdot I \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min(Y, T \cdot (V+v)) \cdot \min(X, R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr)\right\}.$$

Поскольку размеры X и Y были нами выбраны произвольно, то, устремляя их к бесконечности, мы получим вероятность избежать столкновения с любым из встречных судов за время T :

$$\overline{P}(T) = \exp\left\{-2 \cdot I \cdot T \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (V+v) \cdot (R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr)\right\} = \quad (9)$$

$$= \exp\{-2 \cdot I \cdot T \cdot (V \cdot R + V \cdot M_{\rho} + R \cdot M_v + M_{\sigma})\}$$

В случае независимости скоростей и ширин встречных судов формула упрощается:

$$\overline{P}(T) = \exp\{-2 \cdot I \cdot T \cdot (V + M_v) \cdot (R + M_{\rho})\}. \quad (10)$$

При этом существует интересная геометрическая интерпретация полученного результата. Из рис. 3 видно, что вероятность нашему судну избежать столкновения с любым из судов, находящихся в акватории правее нас, равна вероятности того, что в области, образуемой прямоугольниками 1-4, не окажется ни одного встречного судна.

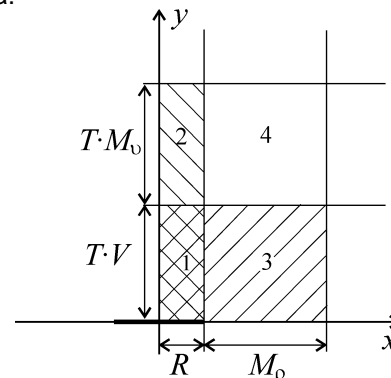


Рис. 3. Геометрическая интерпретация вероятности отсутствия столкновения с встречным судном

В силу симметрии модели, то же справедливо для судов, находящихся в акватории левее нас. В случае зависимых скоростей и ширин встречных судов эта картина исказится за счёт изменения площади области 4, так как $M_{\sigma} \neq M_v \cdot M_{\rho}$.

4. Вероятность столкновения с попутным судном

Модель движения нашего судна в параллельном попутном потоке прочих судов (рис. 2) полностью описывается разделами 1–3, если в них слово «встречный» и производные от него заменить на «попутный» и соответствующие про-

изводные от него. Однако механизм столкновения выглядит иначе.

Очевидно, что столкновения заключается в том, что

1. либо судно, находящееся в момент времени $t=0$ позади нашего (его ордината отрицательна), но идущее с более высокой скоростью, таранит нас в корму,

2. либо наше судно таранит в корму судно, находящееся в момент времени $t=0$ впереди нашего (его ордината положительна), но идущее с более низкой скоростью.

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

Аналогично случаю встречного потока судов положим, что нам известно, что в момент времени $t=0$ в прямоугольной области акватории Π , для которой $-X \leq x \leq X$, $-Y \leq y \leq Y$, где $X > R$, $Y > T \cdot V$ находится единственное судно (будем называть его выделенным). Площадь этого прямоугольника – $S_{\Pi} = 4 \cdot X \cdot Y$. Ни координаты (ξ_1, ζ_1) , ни характеристики (v_1, ρ_1) выделенного судна нам не известны. Требуется найти вероятность $P_1(T, X, Y)$ того, что за время T произойдёт столкновение с ним нашего судна. Нижний индекс 1 этой вероятности означает, что это вероятность столкновения с одним судном.

Очевидно, что $P_1(T, X, Y) = P_{I,1}(T, X, Y) + P_{II,1}(T, X, Y)$, где $P_{I,1}(T, X, Y)$ и $P_{II,1}(T, X, Y)$ – вероятности тарана I-го и II-го типов соответственно.

Аналогично случаю встречного потока судов, условием столкновения любого типа для координаты ξ_1 является $|\xi_1| \leq \rho_1 + R$.

Кроме того, условиями тарана I-го типа будут $V < v_1$, $T \cdot (V - v_1) < \zeta_1 < 0$, (11)

иначе выделенное судно за время T не догонит наше, а тарана II-го типа –

$v_1 < V$, $0 < \zeta_1 < T \cdot (V - v_1)$, (12)

иначе за время T мы не догоним выделенное судно.

В силу пуассоновости поля судов координаты выделенного судна есть случайная величина, равномерно распределённая в области Π , с плотностью распределения S_{Π}^{-1} [1]. Поэтому

$$\begin{aligned} P_{I,1}(T, X, Y) &= \\ &= S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_{\max(-Y, T \cdot (V - v))}^0 \left(\int_{-\min(X, R+r)}^{\min(X, R+r)} dx \right) dy \cdot F_{v,\rho}(dv, dr) = \\ &= 2 \cdot S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min(Y, T \cdot (V - v)) \cdot \min(X, R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_{II,1}(T, X, Y) &= \\ &= S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left(\int_{-\min(X, R+r)}^{\min(X, R+r)} dx \right) dy \cdot F_{v,\rho}(dv, dr) = \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &= 2 \cdot S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min(Y, T \cdot (V - v)) \cdot \min(X, R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr); \\ P_1(T, X, Y) &= \\ &= 2 \cdot S_{\Pi}^{-1} \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min(Y, T \cdot |V - v|) \cdot \min(X, R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr). \end{aligned} \quad (15)$$

Далее, дословно повторяя выкладки для случая встречного потока судов, получим

$$\bar{P}(T) = \exp \left\{ -2 \cdot I \cdot T \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} |V - v| \cdot (R+r) \cdot F_{v,\rho}(dv, dr) \right\}. \quad (16)$$

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

$$\bar{P}(T) = \exp \left\{ -2 \cdot I \cdot T \cdot (R + M_{\rho}) \cdot \int_0^{\infty} |V - v| \cdot F_v(dv) \right\}. \quad (17)$$

Рассмотрим случай, когда скорости попутных судов имеют Гамма-распределение [6]:

$$f_v(v) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} v^{a-1} e^{-bv}, \quad v \geq 0, \quad (18)$$

где $\Gamma(a)$ – гамма-функция:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad (19)$$

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

Тогда формула (17) может быть преобразована к виду

$$\bar{P}(T) = \exp \left\{ -2 \cdot I \cdot T \cdot (R + M_{\rho}) \cdot \int_0^{\infty} |V - v| \cdot f_v(v) dv \right\}. \quad (20)$$

5. Вероятность столкновения в потоке встречных и попутных судов

Так как отсутствие столкновения нашего судна с встречным судном и попутным судном в рамках предложенной модели являются независимыми событиями, то вероятность отсутствия аварии при движении нашего судна в потоке встречных и попутных судов может быть определена путем преобразования формул (10) и (20)

$$\begin{aligned} \bar{P}(T) &= \exp \left\{ -2 \cdot I \cdot T \cdot (V + M_v) \cdot (R + M_{\rho}) \right\} \times \\ &\times \exp \left\{ -2 \cdot I \cdot T \cdot (R + M_{\rho}) \cdot \int_0^{\infty} |V - v| \cdot f_v(v) dv \right\}. \end{aligned} \quad (21)$$

Результаты расчета в рамках предлагаемой математической модели представлены на рис. 4, где даны зависимости вероятности отсутствия аварии от продолжительности плавания для различных скоростей нашего судна.

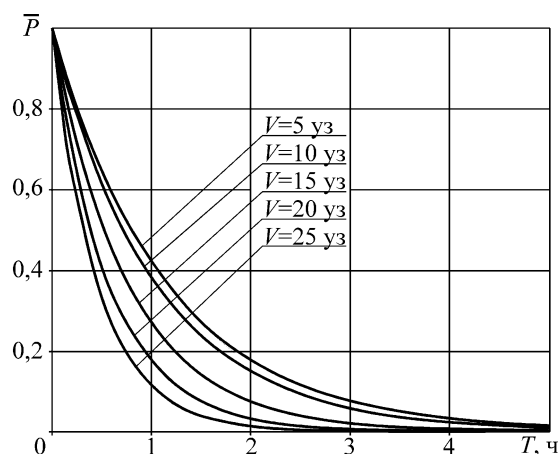


Рис. 4. Результаты расчета по предложенной модели

В расчетах принималось, что скорости встречных и попутных судов имеют Гамма-распределение с параметрами $a = 15$, $b = 1,5 \text{ уз}^{-1}$, т.е. математическое ожидание скоростей встречных и попутных судов $M_v = 10 \text{ уз}$. Кроме того считалось, что полуширина нашего

судна $R = 20 \text{ м}$, математическое ожидание ширины встречных и попутных судов $M_p = 20 \text{ м}$, интенсивность пуассоновского поля, образуемого встречными и попутными судами $I = 1 \text{ миль}^{-2}$. Видно, что с увеличением скорости нашего судна вероятность столкновения возрастает. Кроме того, вероятность безаварийного плавания продолжительностью 5 часов и более практически равна нулю.

Заключение

Предложенная математическая модель позволяет оценить риск столкновения судов при встречных расхождениях и обгонах. Использование данной модели совместно с [3] позволяет обоснованно принимать решения о модернизации конструкций корпусов судов, которые эксплуатируются в районах с высокой вероятностью столкновения, для снижения последствий указанных аварий [2].

Литература

1. Амбарцумян, Р.В. Введение в стохастическую геометрию / Р.В. Амбарцумян, Й. Мекке, Д. Штойян. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
2. Бураковский, Е.П. Конструктивное обеспечение повышения безопасности мореплавания при столкновении судов / Е.П. Бураковский, В.А. Дмитриевский, И.В. Якута // Морской вестник. – СПб.: Мор Вест. – 2007. – №3(23). – С.100–106.
3. Бураковский, Е.П. К вопросу оценки риска столкновения судов / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – №4. – С.35–39.
4. Мاستушкин Ю.М. Гидродинамическое взаимодействие судов при встречах и обгонах / Ю.М. Мастушкин. – Л.: Судостроение, 1987. – 124 с.
5. 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.
6. 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. Moscow, 1989, 400 p.
2. Burakovskiy E.P, Dmitrovskiy V.A., Yakuta I.V. (2007). Konstruktivnoye obespecheniye povysheniya bezopasnosti moreplavaniya pri stolknovenii sudov. Morskoy vestnik, №3(23), pp.100–106.
3. Burakovskiy E.P., Burakovskiy P.E., Dmitrovskiy V.A. (2015). K voprosu otsenki riska stolknoveniya sudov. Morskie intellektual'nye tekhnologii, №4, pp. 35–39.
4. Mastushkin Yu.M. Gidrodinamicheskoye vzaimodeystvie sudov pri vstrechakh i obgonakh. Leningrad, 1987, 124 p.
5. 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.
6. 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 624.012

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВО ФЛОРАХ С ОВАЛЬНЫМИ И КРУГЛЫМИ ВЫРЕЗАМИ**Алексей Игоревич Притыкин**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. А. Невского, 14
e-mail: prit_alex@mail.ru

Аннотация

Для оценки прочности пронизываемых флоров с вырезами в стенке необходимо знать уровень напряжений, возникающих в них при действии внешних сил. В справочной литературе имеется информация о концентрации напряжений в районе овальных вырезов в пластине конечной ширины только при ее осевом растяжении. В реальных балках имеет место совместное действие поперечных сил и изгибающего момента. Основная цель работы заключалась в установлении закономерностей распределения напряжений в пронизываемых флорах и получении эмпирической зависимости для оценки эквивалентных напряжений вблизи овальных и круглых вырезов при точечных нагрузках. Второй задачей было исследование распределения касательных напряжений в перемычках и получение аналитической зависимости для их средних значений. Исследование распределения напряжений выполнялось с помощью метода конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS. Результаты расчета флоров показали, что коэффициент концентрации напряжений невысок и для флоров с параметрами перфорации, удовлетворяющими требованиям Регистра, находится в пределах 1.1-1.24. Установлено, что при постоянной поперечной силе распределение эквивалентных напряжений в зонах концентрации по длине балки носит линейный характер, т.е. изменяется пропорционально величине изгибающего момента. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с численными расчетами МКЭ. Расхождение в результатах расчета по эмпирической зависимости и МКЭ не превышает 1-5%. Результаты исследований помогут проектировщикам принимать более обоснованные решения при выборе оптимальных размеров конструкций.

Ключевые слова: флоры, овальные и круглые вырезы, напряжения, эмпирическая зависимость, МКЭ, эксперимент.

STRESS DISTRIBUTION AND STRESS CONCENTRATION IN FLOORS WITH OVAL AND CIRCULAR OPENINGS**Alexej Pritykin**

the Docent, Doctor of Technical Sciences, the Professor of Department of Shipbuilding
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1,
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A. Nevskogo, 14
e-mail: prit_alex@mail.ru

Abstract

For estimation of strength of ship floors with openings in web it is necessary to know the level of stresses appearing in them under external loads. In manuals there is information about stress concentration near oval openings in plate of limited width only for case of axial tension. In real beams joint action of shear forces and bending moment takes place. The major aim of work was to determine regularities of stress distribution in penetrated floors and obtain the empirical relation for maximum equivalent stresses near the oval and circular openings under pointed loads. A second purpose was to investigate the shear stress distribution in web-posts and the analytical expression for average value of shear stress was obtained. Research of stress distribution was performed with help of the finite element method using the program complex ANSYS. Results of floor calculation show that the stress concentration factor is not high and for parameters of perforation satisfying to the Register demands is in limit of values 1.1-1.24. It was also estimated, that under constant shear force the distribution of equivalent stresses in zones of concentration along the beam has lineal character, i.e. is proportional to changing

of the bending moment. Obtained results are in good correlation with numerical calculations by FEM. Divergence in results of calculation on empirical relation and by FEM does not exceed 1-5%. Results of investigation can help to designers to adopt more reliable solutions about the choice of optimal dimensions of structures.

Key words: penetrated floors, oval and circular openings, stresses, empirical relation, FEM, experiment.

Введение

В большинстве флоров корпусов судов выполняются регулярно расположенные облегчающие вырезы овальной или круглой формы. Балки с перфорированной стенкой применяются не только в судостроении, но и в строительстве и в авиастроении (например, подпалубные балки аэробусов A380).

Наличие вырезов приводит к локальному повышению уровня напряжений вблизи их кромок. В справочной литературе имеется лишь информация о концентрации напряжений в районе овальных регулярно расположенных вырезов в пластине конечной ширины при ее осевом растяжении. В реальных балках имеет место совместное действие поперечных сил и изгибающего момента. Основная цель работы заключалась в установлении закономерностей распределения напряжений в пронизываемых флорах и получении эмпирической зависимости для максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ вблизи овальных и круглых вырезов при точечных нагрузках. Второй задачей было исследование касательных напряжений τ_{yz} в перемычках и получение аналитической зависимости для их средних значений. Располагая величинами $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$, можно вычислить концентрацию напряжений во флорах при поперечном и чистом изгибе.

Согласно требованиям Регистра высота вырезов во флорах ограничивается величиной $0.6H$ (H – высота флора), расстояние между их кромками должно быть не менее $0.5H$, а протяженность овального выреза не должна превышать $1.2H$. В основном в работе исследовались балки именно с такой перфорацией (рис. 1).

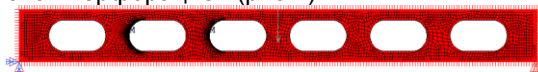


Рис. 1. Расчетная схема флора с вырезами

Хотя вопросам определения прочности пронизываемых флоров и балок с вырезами разной формы посвящено немало работ [1-6], в них нет оценки уровня напряжений в зависимости от параметров перфорации и величин силовых факторов.

1. Вывод зависимостей для эквивалентных и касательных напряжений

Рассмотрим шарнирно опертую балку с овальными вырезами, нагруженную одной или двумя силами в пролете. Такое нагружение обеспечивает постоянство поперечной силы V на участке между опорой и силой.

При наличии овальных вырезов перфорация стенки определяется тремя параметрами: радиусом выреза r , шириной перемычки s , равной минимальному расстоянию между кромками вырезов (рис. 2) и длиной b прямоугольной вставки между двумя полукругами, составляющими овал. Для определения геометрии балки использовалась следующая форма записи: $l - H - t_w - b_f - t_f c m - \beta - \xi - \eta$. Входящие сюда величины интерпретируются как: l – длина балки, H – полная высота ее, t_w – толщина стенки, b_f и t_f – ширина и толщина полок, $\beta = 2r/H$ – относительная высота вырезов, $\xi = c/H$ – относительная ширина перемычек, $\eta = b/H$ – относительная длина прямоугольной вставки. Размеры балки указываются в сантиметрах.

Как указано в Регистре, расчет днищевых конструкций должен выполняться помимо распределенных и на действие сосредоточенных нагрузок.

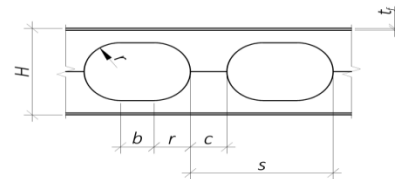


Рис. 2. Основные обозначения балки с овальными вырезами

Что касается прочности флоров, то в настоящее время она оценивается по нормативам для напряжений в полках флоров, но в Регистре отмечается, что при необходимости может применяться и прямой компьютерный расчет прочности днищевых конструкций. Совершенствовать требования Регистра можно путем разработки надежных зависимостей для оценки напряжений, базирующихся на результатах расчета конструкций МКЭ.

Поскольку при поперечном изгибе существенна роль как изгибающего момента M , так и поперечной силы V , эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ представим в виде суммы двух слагаемых

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = \alpha_V \frac{V}{H t_w} + \alpha_M \frac{M_x}{W}, \quad (1)$$

где α_V и α_M – числовые коэффициенты, определяемые из расчетов МКЭ; M_x – величина изгибающего момента от заданной внешней нагрузки в сечении, где определяются эквивалентные

напряжения; W - момент сопротивления поперечного сечения балки без вырезов.

Приближенно величину W можно определить как

$$W \approx \frac{b_f t_f H^2 / 2 + H^3 t_w / 12}{0.5H} = b_f t_f H + H^2 t_w / 6. \quad (2)$$

Величину изгибающего момента M для n -го выреза приближенно можно записать в форме

$$M_x = Vx \approx V(n-1)s, \quad (3)$$

где s - шаг вырезов; n - порядковый номер выреза, у контура которого определяются эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$.

В общем случае шаг овальных вырезов может быть записан как (рис.2)

$$s = 2r + b + c. \quad (4)$$

Учитывая принятые выше обозначения, выразим (4) в виде

$$s = (\beta + \xi + \eta)H. \quad (5)$$

Подстановка (2), (3) и (5) в (1) после несложных преобразований приводит к зависимости

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = (\alpha_V + \alpha_M \frac{(n-1)(\beta + \xi + \eta)}{6b_f t_f / H t_w + 1}) \frac{V}{H t_w}. \quad (6)$$

Таким образом, для вычисления $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ необходимо знание числовых коэффициентов α_V и α_M , которые определяются с помощью расчетов МКЭ.

Знание величин $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ позволяет определить коэффициент концентрации напряжений α_σ как

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max}^{\text{экв}} / \sigma_{\max}^{\text{ТТ}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\max}^{\text{ТТ}} = M_{\max} / W$ - напряжения в полке, вычисляемые по технической теории изгиба в наиболее нагруженном сечении.

В работе были проведены две группы расчетов: при постоянной поперечной силе V и при постоянном моменте M .

В первом случае рассматривалась шарнирно опертая балка, нагруженная силой P в пролете, а во втором - балка нагружалась двумя силами P , приложенными на равных расстояниях от опор, что обеспечивало ее чистый изгиб в средней части.

Расчету подвергались балки размерами $l = 40 - 0.2 - 10 - 0.3 \text{ см} - 0.6 - 0.5 - 0.65$ при одной и той же поперечной силе $V = 0.5 \kappa H$.

При поперечном изгибе в перемычках проникаемых флоров значительных величин достигают касательные напряжения из-за уменьшения площади передачи усилий между верхним и нижним тавровыми поясами. Именно напряжения τ_{xy} часто становятся причиной потери устойчивости стенок флоров при слемминге или посадке на мель.

Представленная на рис.3 схема действия усилий на фрагмент проникаемого флора позволяет установить связь между поперечной силой V и касательным усилием T . Из уравнения равновесия суммы моментов относительно оси,

проходящей через линию равнодействующих N_1 и N_2 , получим

$$T = V s / f, \quad (8)$$

где f - расстояние между равнодействующими продольных усилий в тавровых поясах (рис.3).

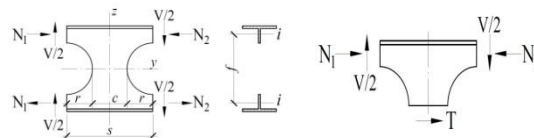


Рис.3. Усилия, возникающие в сечениях флора с вырезами

В зависимости (8) неизвестную величину f , можно найти, составив второе уравнение равновесия в виде суммы проекций всех сил на горизонтальную ось

$$T = N_2 - N_1. \quad (9)$$

Из совместного рассмотрения условий (8) и (9) можно определить плечо f , которое, хоть и зависит от относительной высоты вырезов β , приближенно можно принять равным $f = 0.96H$.

Предполагая равномерное распределение τ_{yz} по ширине перемычки, получим из (8) с учетом f

$$\tau_{cp} = 1.04 V s / c t_w H. \quad (10)$$

Убедиться в приемлемости соотношений (6) и (10) можно с помощью расчетов МКЭ.

2. Расчет напряжений во флорах МКЭ

Как известно, точность расчетов МКЭ во многом определяется размерами КЭ: чем меньше конечный элемент, тем, как правило, точнее расчет. Однако применять сетку КЭ малых размеров для всей конструкции не представляется возможным из-за ограниченности памяти компьютера и продолжительности счета.

Для сокращения размеров системы уравнений в работе учитывалась симметрия конструкции и использовалась неравномерная сетка КЭ. Причем мелкая сетка КЭ применялась в районе лишь нескольких вырезов и не по всему контуру, а только на части его (рис.1).

Анализ показал, что приемлемая точность достигается при размерах КЭ, составляющих примерно $0.017r$, поэтому в расчетах размеры КЭ вблизи контура выреза составляли $\Delta_{КЭ} = 2 \text{ мм}$, а в остальной части балки - $\Delta = 20 \text{ мм}$ при радиусе вырезов $r = 120 \text{ мм}$.

Сравнение уровня напряжений $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ в районе вырезов при изгибе двух флоров указанных выше размеров при длине флора $l = 800 \text{ см}$ в первом случае (рис.4,а) и $l = 1600 \text{ см}$ во втором случае (рис.4,б) показало, что их величина изменяется пропорционально номеру выреза n и при постоянстве поперечной силы V не зависит от длины балки. В обоих случаях сила $P = 1 \kappa H$ прикладывалась посередине пролета.

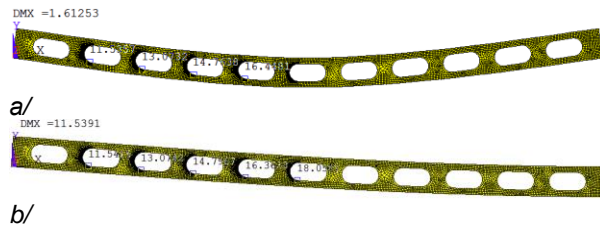


Рис.4. Напряжения во флоре при действии силы $P=1\text{кН}$ посредине пролета: а/ длина балки $l=8\text{м}$; б/ длина балки $l=16\text{м}$ (показана половина длины)

Аналогичные расчеты, проведенные при другой величине силы P , приложенной в сечении $x=2l/3$, дают такой же уровень напряжений в районе вырезов, если остается неизменной величина опорной реакции V .

В этом отношении зависимость (6) можно считать универсальной, поскольку она верна при нагружении балки сосредоточенной силой в любом сечении. Более того, ее можно распространить и на случай действия двух произвольно приложенных сил для участков балки между опорой и ближайшей к ней силой. Отметим, что при наличии двух сил определение напряжений на концевых участках будет достаточным для анализа прочности балки, так как именно на одном из этих участков и изгибающий момент M и поперечная сила V будут максимальными.

Для указанной балки на основании решения системы уравнений (6) для двух произвольных сечений были найдены коэффициенты $\alpha_V=15.4$ и $\alpha_M=5.1$. Подставив указанные значения α_V и α_M , вычислим по (6) напряжения для 5-го выреза

$$\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}} = (15.4 + 5.1 \frac{(5-1)(0.6+0.5+0.65)}{6 \cdot 100 \cdot 3 / (400 \cdot 2) + 1}) \frac{0.5 \cdot 10^3}{400 \cdot 2} = 16.5 \text{ МПа}.$$

Расхождение с расчетом МКЭ (16.4 МПа) не больше 0.6%. Аналогичные вычисления для 2-го выреза по (6) приведут к величине $\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}}=11.34 \text{ МПа}$ с погрешностью примерно в 1.7%.

Увеличение относительной длины вставки до $\eta=0.9$ (рис.5,а) при неизменных остальных параметрах приводит к росту уровня напряжений из-за возрастающей роли деформаций сдвига.

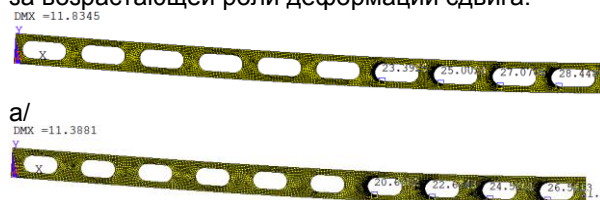


Рис.5. Напряжения во флоре 1600-40-0.2-10-0.3см-0.6: а/ $\xi=0.5$; $\eta=0.9$; б/ $\xi=0.8$; $\eta=0.6$ при $V=0.5\text{кН}$

Влияние сдвига определяется первым слагаемым в (6), вследствие чего α_V возрастает до 18, а α_M сохраняет то же значение 5.1. Тогда для 9-го выреза (рис.5,а) имеем по (6)

$$\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}} = (18 + 5.1 \frac{(5-1)(0.6+0.5+0.9)}{6 \cdot 100 \cdot 3 / (400 \cdot 2) + 1}) \frac{0.5 \cdot 10^3}{400 \cdot 2} = 26.9 \text{ МПа}.$$

Расхождение с расчетом МКЭ составляет 0.5%.

Для флора с параметрами перфорации $\beta-\xi-\eta=0.6-0.8-0.6$, т. е. с увеличенной шириной перемычек (рис.5,б), величина коэффициента α_V снижается до 14, при той же величине $\alpha_M=5.1$. Результаты расчета по (6) при этих значениях α_V и α_M и по МКЭ (рис.5,б) практически полностью совпадают.

Если положить в (6) $\eta=0$, то получим зависимость для варианта флора с круглыми вырезами

$$\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}} = (\alpha_V + \alpha_M \frac{(n-1)(\beta+\xi)}{6b_f t_f / H t_w + 1}) \frac{V}{H t_w}. \quad (11)$$

Результаты расчета МКЭ флора размерами 1600-40-0.2-10-0.3см-0.6-0.5, приведенные на рис.6, показывают, что и в этом случае напряжения $\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}}$ во флоре при постоянной поперечной силе пропорциональны номеру выреза. Как можно судить по сопоставлению рис.5,б и рис.6, величины напряжений $\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}}$ уменьшились, что объясняется увеличением жесткости балки на сдвиг. На половине длины балки количество круглых вырезов возросло до 18-ти вместо 10-ти при овальной их форме. На рис.6 указаны напряжения в районе вырезов с номерами $n=6-9-12-15-18$.

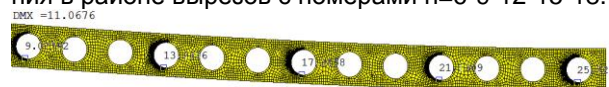


Рис.6. Напряжения во флоре длиной $l=16\text{м}$ при силе $P=1\text{кН}$ (показана часть балки)

Показанное на рис.6 напряженное состояние хорошо аппроксимируется зависимостью (11) при величинах $\alpha_V=3.4$ и $\alpha_M=6.6$. Расхождение с расчетами МКЭ для этих вырезов менее 1%.

Уровень напряжений $\sigma_{\max}^{\text{ЭКЭ}}$ при чистом изгибе во флорах с круглыми и овальными вырезами показан на рис.7.

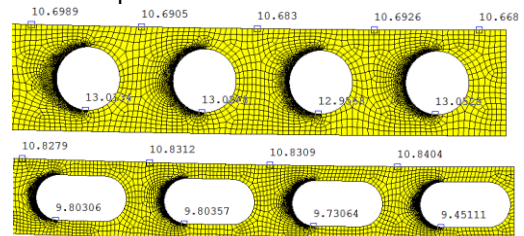


Рис.7. Напряжения во флоре при чистом изгибе

Оригинальным получается результат: при постоянстве момента напряжения в балке с круглыми вырезами (рис.7) оказываются на 33% выше, чем в балке с овальными вырезами, хотя при поперечном изгибе круглые вырезы предпочтительнее.

Из рис.8 видно, что на нейтральной оси флора

размерами 400-48-0.2-10-0.3см-0.667-0.333 с круглыми вырезами при $V=10\text{кН}$ касательные напряжения распределяются по ширине перемычки неравномерно, поскольку на краях вырезов они равны нулю и достигают максимума примерно посередине ширины перемычки. При этом величина τ_{\max} почти в 1.3 раза превышает средний их уровень.



Рис.8. Напряжения $\tau_{уз}$ в перемычке флора при $V=10\text{кН}$

Вычисленная по зависимости (10) средняя величина напряжений τ_{cp} будет равна

$$\tau_{cp} = 1.04 \cdot 10^4 \cdot 480 / (160 \cdot 2 \cdot 480) = 33.2 \text{ МПа},$$

а найденная по правилу трапеций по данным рис.8 приводит к величине $\tau_{cp}^{МКЭ} = 32.5 \text{ МПа}$. Расхождение в значениях не превышает 2.1%.

3. Оценка концентрации напряжений

Располагая величинами напряжений $\sigma_{\max}^{ЭКВ}$, можно определить значения коэффициентов концентрации напряжений α_{σ} по (7), если известен уровень напряжений в балке со сплошной стенкой. Для флора размерами 1600-40-0.2-10-0.3см напряжения $\sigma_{\max}^{ТТ} = 23 \text{ МПа}$, а в районе круглых вырезов $\sigma_{\max}^{ЭКВ} = 25.2 \text{ МПа}$ (рис.6), что приводит к величине $\alpha_{\sigma} \approx 1.1$. Для овальных вырезов, представленных на рис.5,а, значение $\alpha_{\sigma} \approx 1.24$.

Заключение

Итогом работы явились:

- эмпирическая зависимость (6) для оценки уровня эквивалентных напряжений по Мизесу в пронашиваемых флорах с овальными и круглыми вырезами при действии точечной нагрузки, учитывающая действие двух силовых факторов V и M и параметры перфорации стенки;
- значения коэффициентов силы и момента α_V и α_M , необходимые для расчета напряжений по зависимости (6) конкретной балки;
- аналитическая зависимость (10) для оценки средних значений касательных напряжений, возникающих в перемычках флоров при заданной поперечной силе V ;
- проверка применимости полученных зависимостей численными расчетами МКЭ;
- величины коэффициентов концентрации напряжений α_{σ} , вычисленные для флоров с круглыми и овальными вырезами.

Благодарность. Автор благодарит Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР АААА-А17-117051840014-8).

Литература

1. Шаньгин И.Д. Прочность и устойчивость стенок рамных связей судов внутреннего плавания в районе вырезов: автореф. дисс... канд. техн. наук. Н.Новгород, 1994.- 25с.
2. Притыкин А.И. Концентрация напряжений во флорах с круглыми и овальными вырезами. Вестник АГТУ, 2009. 1, 76-81.
3. *Liu T.C., & Chung K.F.* (2003) Steel beam with large web opening of various shapes and sizes: Finite element Investigation. J. of Constructional steel Research. 59. 1159-1176.
4. *Lagros N. D., Psarras L. D., Papadrakasis M., & Panagiotou G.* (2008) Optimum design of steel structures with web opening. J. of Engineering Structure. 30(4). 2528-2537.
5. *Chhapkhane, Sashikant R. Kamble.* (2012) Analysis of Stress distribution in castellated beam using finite element method and experimental techniques. Int. J. of Mech. Eng. applications Research. 3(3). 190-197.
6. *Jamadar F. M., & Kumbhar P. D.* (2015) Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings. International Research Journal of Engineering and Technology. 2 (2). 715-722.

References

1. Shangin I.D. Prochnost i ustojchivost stенок ramnyh svjazej sudov vnutrennego plavania v rajone vyrezov: avtoref. dissert. kand. techn. nauk: 05.08.02 – Stroitel'naja mehanika korablja. NPI. – N.Novgorod, 1994.- 25s.
2. Pritykin A.I. (2009) Konzentrazia napriazhenij vo florah s kruglymi i ovalnymi vyrezami. Vestnik AGTU. 1, 76-81.
3. *Liu T.C., & Chung K.F.* (2003) Steel beam with large web opening of various shapes and sizes: Finite element Investigation. J. of Constructional steel Research. 59. 1159- 1176.
4. *Lagros N. D., Psarras L. D., Papadrakasis M., & Panagiotou G.* (2008) Optimum design of steel structures with web opening. J. of Engineering Structure. 30(4). 2528-2537.
5. *Chhapkhane, Sashikant R. Kamble.* (2012) Analysis of Stress distribution in castellated beam using finite element method and experimental techniques. Int. J. of Mech. Eng. applications Research. 3(3). 190-197.
6. *Jamadar F. M., & Kumbhar P. D.* (2015) Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaping openings. International Research Journal of Engineering and Technology. 2 (2). 715-722.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.01.(047)

**К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ АРХИТЕКТУРНО – КОНСТРУКТИВНОГО ТИПА
МАЛОГО РЫБОЛОВНОГО ТРАУЛЕРА ДЛЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ****Евгений Андреевич Чуреев**

аспирант,

Калининградский государственный технический университет

236000, Калининград, Советский проспект, 1

e-mail: e.chureev@klgtu.ru

Аннотация

Ведение промысла на Балтике, в основном, ведется в 26 подрайоне Балтийского моря. Согласно статистике, квоты на основные виды добываемой рыбы не выбираются в среднем на 15-30%. Причина этому существующий флот, у которого практически выработан ресурс, а также весьма ограничена возможность его модернизации. Если не предпринимать никаких решений, то часть объема квот будет передана от России другим странам, что в свою очередь нанесет ущерб интересам государства, поставит под угрозу продовольственную безопасность, а также приведет к полной потере промыслового флота на Балтике.

В работе формируются цель и задачи, при решении которых можно получить положительную динамику в рыбопромысловой отрасли Балтийского региона. Рассмотрены основные способы добычи рыбы, промысловые схемы, способы хранения улова, а также архитектурно-конструктивные типы промысловых судов.

В результате исследований, представлен предполагаемый оптимальный архитектурно – конструктивный тип судна для промысла на Балтийском море.

Ключевые слова: Рыбопромысловое судно, траулер, архитектурно – конструктивный тип, рыбная промышленность, Балтийское море, добыча морских биоресурсов, оптимизационное проектирование судна.

**ON THE QUESTION OF THE SELECTION OF THE ARCHITECTURAL-
CONSTRUCTIVE TYPE OF A SMALL FISH TRAWLER FOR THE BALTIC SEA****Evgeniy Chureev**

graduate student,

Kaliningrad state technical university

Sovetskiy ave., 1, Kaliningrad 236000, Russian Federation

e-mail: e.chureev@klgtu.ru

Abstract

Fishing in the Baltic is mainly carried out in 26 subareas of the Baltic Sea. According to statistics, quotas for the main types of fish are not selected on average by 15-30%. The reason for this is the existing fleet, which has practically developed the resource, and also the possibility of its modernization is very limited. If no decisions are taken, part of the volume of quotas will be transferred from Russia to other countries, which in turn will damage the interests of the state, jeopardize food security, and lead to the complete loss of the fishing fleet in the Baltic.

The goal and tasks are formed in the work, in the solution of which it is possible to obtain positive dynamics in the fishing industry of the Baltic region. The main methods of fish extraction, fishing schemes, ways of storing the catch, as well as architectural and constructive types of fishing vessels are considered.

As a result of the research, the proposed optimal architectural and constructive type of vessel for fishing in the Baltic Sea is presented.

Key words: Fishing vessel, Trawler? Architecturally constructive type, Fish industry, Baltic Sea, Extraction of marine bio resources, Optimal design vessel.

Введение

Российские рыбаки работают на Балтийском море в исключительной экономической зоне (ИЭЗ) Российской Федерации в двух районах (согласно классификации ICES/ИКЕС – международный совет по исследованию моря) – юго-восточная часть (26 подрайон) и в Финском заливе (32 подрайон) Балтийского моря. Деление Балтийского моря на районы представлено на рисунке 5.1 [1].

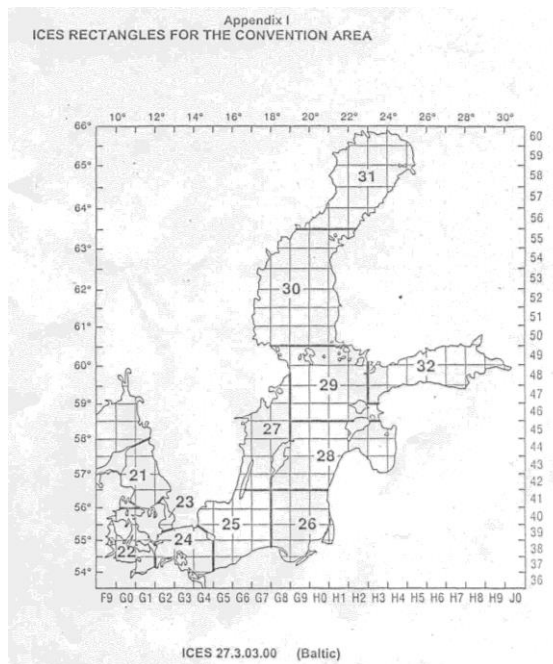


Рис.1 Деление Балтийского моря на подрайоны, согласно ICES

С точки зрения рыболовства, основное значение имеет 26 подрайон. Берега южной части Балтийского моря окаймлены широкой полосой отмели. Изобата 20м удаляется на расстояние до 60 миль от береговой черты. Грунт в южной части Балтийского моря мористее изобаты 20 м преимущественно глина и ил; в пределах этой изобаты грунт главным образом состоит из песка; местами встречается камень, ил, ракушка, гравий.

Согласно данным ФГБНУ "Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии" в водах Балтийского моря вводится 116 видов рыб, но промысловое значение с квотами для Российской Федерации имеют 11 видов: Килька (шпрот), Салака, Треска, Камбала, Лещ, Щука, Сиг, Корюшка, Миноги, Угорь и Балтийский лосось.

Реальная сырьевая база представлена двумя основными группами рыб: Пелагические (Килька – 42600 т, салака – 29600 т) и донные (треска – 6100 т, речная камбала – 1220 т). Через тире указаны объем квот на вылов указанных пород рыб на 2016 год [1].

Также АтлантНИРО располагает данными о реализации выделенных квот по каждой породе. При анализе этих данных, можно увидеть, что за последние 10 лет, существующий промысловый флот в среднем выбирал 67,4% квот по кильке; 72,8% по салаке; 77,3% квот по треске и 86,4% квот по камбале [1].

Таким образом, можно констатировать, что в полном объеме квоты не облавливаются. Основной причиной этого является сильно устаревший, как морально, так и физически, промысловый флот.

1. Существующий флот

В настоящее время промысловый флот, работающий в 26 подрайоне Балтийского моря, представлен в основном малыми рыболовными траулерами (МРТК) пр. 1328 типа «Балтика». Суды, указанного проекта, способны работать донным и пелагическим траулами, но малый дедвейт (30т), в совокупности с маломощной, по современным оценкам, силовой установкой (220 кВт), не способны обеспечить полноценный облов квот.

Некоторые судовладельцы идут на модернизацию своих МРТК – устанавливают более мощную силовую установку (до 370 кВт) и увеличивают объем трюма (тем самым увеличивая дедвейт до 53 т) с одновременным переоборудованием его под хранение улова наливом, тем самым достигая увеличения эффективности судна. Однако, модернизационный потенциал данного проекта на этом практически исчерпан.

При обращении к информации о времени использовании флота в течение года, можно увидеть, что довольно значительный период времени (15-17% годового времени) судно находится вне эксплуатации, в том числе из-за погодных условий [2].

Если не предпринимать никаких решений, то часть объема квот будет передана от России другим странам, что в свою очередь нанесет ущерб интересам государства, поставит под угрозу продовольственную безопасность, а также приведет к полной потере промыслового флота на Балтике.

Для исключения такой ситуации, необходимо достигнуть следующую цель – **обеспечить облов квот в полном объеме, повысив качество добываемых биоресурсов.**

Такую цель можно достигнуть, создав новый конкурентоспособный и высокоэффективный рыбопромысловый флот.

Под словом «флот» в настоящем понимается, в первую очередь, проект судна, способного эффективно работать в акватории Балтийского моря, так как рыбопромышленники готовы заказывать и строить новый флот, но в виду отсутствия проектов, они вынуждены работать на том, что есть, в крайнем случае – при минимальной модернизации.

При создании нового проекта судна – необходимо решить несколько задач:

Задача 1. Создание универсального судна, способного вести промысел, как донной, так и пелагической рыбы.

Учитывая сравнительно небольшие объемы квот донной рыбы, относительно пелагической, нецелесообразно развивать отдельно суда, работающие по донной рыбе.

Задача 2. Минимизировать период жизненного цикла судна вне эксплуатации, по крайней мере, из-за погодных условий.

Задача 3. Повысить экономическую эффективность работы судна, улучшив при этом качество добываемой рыбной продукции.

Рассматривать поставленные задачи отдельно не представляется возможным, в виду того, что судно является сложным инженерно-техническим сооружением, поэтому в настоящей статье будем касаться всех вопросов.

Для понимания универсальности судна, необходимо рассмотреть различия промысловых схем по добыче донной и пелагической рыбы.

Промысел донной рыбы.

Как уже сказано ранее, донную рыбу в 26 подрайоне Балтийского моря представляют, в основном, треска и камбала. Вести промысел на эту рыбу можно несколькими видами орудий лова, но основные из них, используемые на Балтике, это донный трал и ярус. Ярус в основном используется на каменистом грунте и позволяет облавливать относительно крупную, половозрелую рыбу, однако у отечественных рыбопромышленников данный вид лова не закрепился, несмотря на то, что польские и литовские рыбаки активно работают ярусом. Российские рыбопромышленники облавливают донную рыбу при помощи донного трала. В качестве судов для работы с донным тралом используются малые рыболовные траулеры кормового траления пр. 1328 типа «Балтика», общий вид которого представлен на рис. 2.

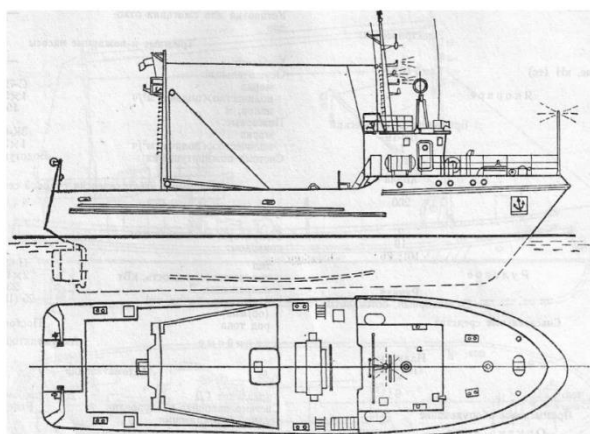


Рис. 2 МРТК типа «Балтика» пр.1328

Особенность промысла трески и камбалы заключается в том, что в первые часы после вылова рыбы необходимо выпустить внутренности, в противном случае внутренние органы рыбы выделяют вещества, которые при попадании в мясо

делают его непригодным для дальнейшего использования. Таким образом, при промысле донных пород рыб на Балтике имеется необходимость обработки пойманной рыбы, перед тем как ее отправить на хранение на борту судна, а учитывая, что размер рыбы разнообразный, то механизация процесса предварительной обработки на борту не используется.

Промысловая схема при работе донным тралом заключается в постановке трала, непосредственно тралении, выборке трала, поднятия кутка на палубу целиком, либо частично (в зависимости от объема улова), и, соответственно, выливка улова на палубу для дальнейшей обработки. Таким образом, на борту судна должны быть установлены ваерные лебедки (для ваеров), сетной барабан (для сетной части трала), кабельная лебедка (для кабеля датчика трала), а также вытяжные лебедки (для вытягивания трала на палубу судна) и вспомогательные лебедки для деления улова *при необходимости) и выливки улова на палубу. Соответственно, для выливки улова на борту должно быть предусмотрена грузовая мачта или портал.

Перечисленные промысловые операции, особенно вытягивание трала на палубу и выливка улова делением, требует достаточного места на промысловой палубе, что, в свою очередь, повлияет на архитектурно- конструктивный тип промыслового судна. Как видно на рис. 2, рубка судна находится в носовой части судна, сразу за рубкой располагаются ваерные лебедки в комплексе с сетным барабаном. Ближе к кормовой части на палубе расположен грузовой портал, при помощи которого и происходит выливка улова из кутка на палубу.

Промысел пелагической рыбы.

Основными видами промысла пелагической рыбы являются траление, использование кошелькового невода и дрейфтерных сетей. Поскольку в Балтийском море отсутствуют крупные скопления рыбы, то практика показала, что кошельковый невод не эффективен, а дрейфтерные сети запрещены к применению. Поэтому основным видом лова пелагической рыбы является траление разноглубинным тралом.

Классическая схема траления донным и пелагическим тралом ничем не отличается, поэтому используется тот же самый набор промыслового оборудования на судне. Однако, килька и салака (основные промысловые пелагические породы рыбы на Балтике), значительно меньше трески и камбалы по размерам и не требуют предварительной обработки после вылова на борту судна. Стремясь оптимизировать процесс лова, а также улучшить качество добываемой рыбы (сохранив ее торговую ценность), на судах стали оборудоваться бункеры для перевозки выловленной рыбы наливом, а впоследствии стали устанавливаться и рыбонасосы, способные перекачивать улов непосредственно из кутка трала в рыбные трюма, не поднимая трал на борт судна. Все это позволило на современных рыболовных судах отка-

заться от большой промысловой палубы, вытяжных лебедок, а также от массивного грузового устройства. Функция последнего сводится к приподниманию кутка трала для подключения к нему приемного патрубка рыбонасоса.

Общий вид современного траулера, работающего пелагическим тралом, представлен на рис.3 и рис.4 [1].

В отношении архитектурно – конструктивного исполнения данных судов сразу можно отметить следующее:

- объединенная промыслово-ходовая рубка находится в средней части, немного смещенная в нос от миделя;
- рыбный наливной трюм находится в средней части;
- машинное отделение находится в кормовой части судна, валопролетная прямая и короткая;
- на судах отсутствует кормовой слип, имеется только небольшой полуслип;
- небольшие площади промысловой палубы;
- сетные барабаны располагаются непосредственно в кормовой части
- в качестве грузового устройства используются гидравлические краны;
- суда имеют 2 палубы;
- практически все суда имеют носовой бульб.

Важно отметить, что при данном архитектурно- конструктивном решении рыбаки получают возможность работать в шельтердечном пространстве, минимизировав при этом время работы на открытой палубе. Также необходимо отметить, что носовой бульб на судах данного типа служит для повышения мореходных качеств – всхожести на волну, а также для упрощения удифферентовки судна.

Грузоподъемное оборудование, установленное на борту судна – гидравлические краны - служат в первую очередь для приподнимания кутка трала с целью подключения приемного конца рыбонасоса. Рыбонасос может быть установлен как на открытой, так и на шельтердечной палубе.

Способ хранения и охлаждения улова.

Если способов хранения улова всего два – наливом и в сухом виде в ящиках, то способов охлаждения улова несколько больше. Изначально основным способом охлаждения было пересыпание улова битым льдом, который изначально брали с берега и хранили в рыбном трюме. Далее, с развитием технологий, на судах стали устанавливаться ледогенераторы чешуйчатого, пузырчатого льда, которым пересыпался улов в ящиках, или лед добавлялся в рыбный танк, для поддержания оптимальной температуры водорыбной смеси. В последнее время стали использовать генераторы жидкого льда, а также RSW-танки – емкости со стенками,

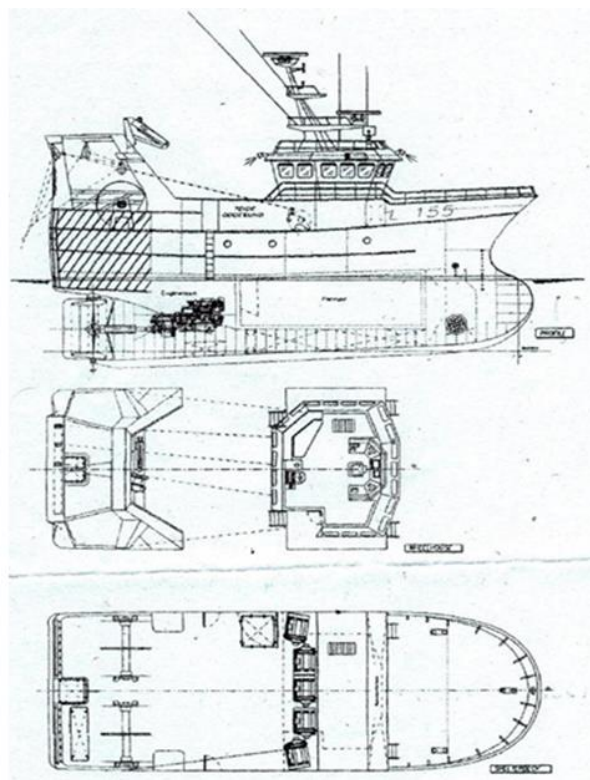


Рис.3 Малый наливной траулер скандинавской постройки длиной 24 метра

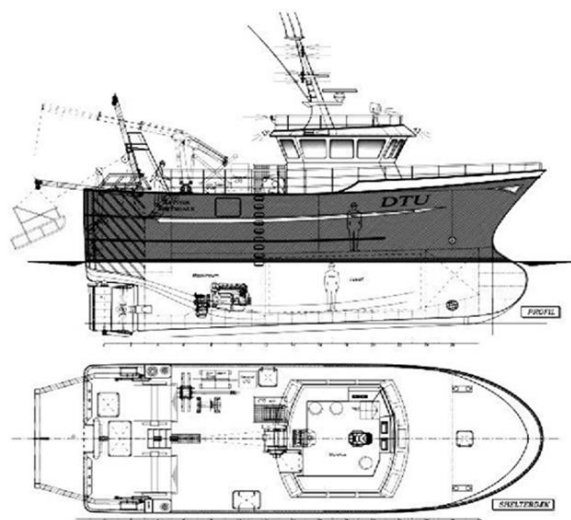


Рис.4 Малый наливной траулер скандинавской постройки длиной 17 метров охлаждаемыми забортной водой, позволяющие также охлаждать водорыбную смесь при способе хранения наливом.

Предполагаемый оптимальный архитектурно – конструктивный тип судна для промысла на Балтийском море.

На основании всего вышесказанного, можно вывести архитектурно - конструктивный тип оптимального судна для ведения промысла донной и пелагической рыбы на Балтийском море:

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

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

- машинное отделение на судне должно быть размещено в кормовой части с прямой валопроводом;

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

- судно должно иметь две палубы, причем в шельтердечном пространстве должно быть размещено, по возможности, наибольшее количество оборудования для минимизации промысловых операций на открытой палубе;

- корпус судна должен быть оборудован носовым бульбом для лучшего поведения судна на коротком крутом волнении Балтийского моря;

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

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

- на борту судна должен быть установлен гидравлический кран, предназначенный для подключения приемного шланга рыбонасоса к кутку трала, либо для выливки частями улова донных пород рыб;

- при ведении промысла на донные породы рыб, предварительная обработка улова должна проходить в закрытых помещениях.

Примерный архитектурно-конструктивный тип малого рыболовного судна для Балтийского моря представлен на рис. 5 [3]



Рис. 5. Боковой вид промыслового судна, с близким к оптимальному архитектурно - конструктивному облику.

Литература

1. Разработка концептуального проекта модернизации маломерного рыболовного траулера по типу пр. 1328 («Балтика»), для северо-западного региона России, с возможностью использования функции

прохождения промысловой практики и обучения будущих специалистов отраслевых учебных заведений [Текст]: технический отчет: / ФГБОУ ВО «КГТУ»; рук. Злыгостев Д.В.; исполн.: Маслюк Е.В. [и др.]. – Калининград, 2016. – 121 с. (на правах рукописи).

2. Чуреев Е.А. Несоответствие мощностей промыслового флота и береговой инфраструктуры в Калининградской области // Материалы международного морского форума. – Калининград: из-во БГАРФ, 2016.- 1648 с.
3. Веб-сайт «Ship spotting» [Электронный ресурс].
URL: <http://www.shipspotting.com/gallery/photo.php?lid=2297963> (дата обращения 14.07.2017).

References

1. Razrabotka kontseptualnogo proekta modernizatsii malomernogo rybolovnogo traulera po tipu pr. 1328 («Baltika»), dlya severo-zapadnogo regiona Rossii, s vozmozhnostyu ispolzovaniya funktsii prohozhdeniya promyslovoy praktiki i obucheniya buduschih spetsialistov otraslevyih uchebnyih zavedeniy [Tekst]: tehicheskiy otchet: FGBOU VO «KGTU»; ruk. Zlyigostev D.V.; ispoln.: Maslyuk E.V. [i dr.].Kaliningrad, 2016. 121 s. (na pravah rukopisi).
2. Chureev E.A. Nesootvetstvie moschnostey promyislovogo flota i beregovoy infrastruktury v Kaliningradskoy oblasti. Materialyi mezhdunarodnogo morskogo foruma. Kaliningrad: iz-vo BGARF, 2016. 1648 s.
3. Veb-cayt «Ship spotting» [Elektronnyiy resurs].
URL:<http://www.shipspotting.com/gallery/photo.php?lid=2297963> (data obrascheniya 14.07.2017).

УДК 629.5.01

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ВИБРАЦИИ СРЕДНИХ ДВУХПАЛУБНЫХ ТРАУЛЕРОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Сергей Васильевич Дятченкод.т.н., зав. кафедрой кораблестроения
ФГБОУ ВО «КГТУ»

236000 Калининград, ул. Проф. Баранова, 43

E-mail: svd.ks@mail.ru

Валерий Анатольевич Коробчинский

руководитель проекта судостроения

ООО «Техцентр»

E-mail: val-kor@mail.ru

Аннотация

Требования рыночной экономики к техническим и экономическим характеристикам промысловых судов обуславливают необходимость применения системного подхода и оптимизации подсистем и их основных элементов. Одной из важных задач проектирования рыболовных судов является определение характеристик конструкции корпуса, начиная с ранних стадий проектирования. Конструкция корпуса является определяющим фактором по нагрузке масс, обеспечению безопасности мореплавания и вибрационных условий обитания, а также определения коэффициента утилизации по грузоподъемности и стоимости постройки судна. На ранних стадиях проектирования рыболовного судна, проектиранту необходимо методическое обеспечение, позволяющее в автоматизированном режиме выбирать основные элементы и определять характеристики конструкции корпуса для судна заданного назначения. Работа посвящена анализу основных элементов средних двухпалубных рыболовных судов, и разработке математических моделей, позволяющих на ранних стадиях проектирования выбрать оптимальные варианты конструктивного исполнения для обеспечения норм прочности и вибрации рыболовного судна.

Ключевые слова: Промысловое судно, конструкция корпуса, математические модели, прочность, вибрация

MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATION OF STRENGTH AND VIBRATION OF MEDIUM DOUBLE-DECK TRAWLERS AT EARLY STAGES OF THEIR DESIGN

Sergey Dyatchenko

Dr.sci.tech., зав. Кафедрой кораблестроения ФГБОУ ВО «КГТУ»

236000 Калининград, ул. Проф. Баранова, 43

E-mail: svd.ks@mail.ru

Valeriy Korobchinskiy

The head of the shipbuilding project Techcenter Ltd

E-mail: val-kor@mail.ru

Abstract

The market economy demands to technical and economical characteristics of fishing vessels make it necessary to use system approach and optimization of subsystems and their basic elements. One of the important tasks for designing fishing vessels is determining characteristics of hull structure starting from the early stages of designing. The hull structure is the determining factor of mass loading, securing sailing safety and vibration conditions for accommodating crew as well as determining utilization ratio of loading capacity and expenses for constructing vessel. At the early stages of designing fishing vessel a designer needs a design technique manual allowing to pick out basic elements and determine structural characteristics of the hull for a special purpose vessel in an automatic mode. The paper analyzes basic elements of medium double deck fishing vessels and makes out mathematical models allowing to pick out optimum variants of construction adaptation for securing strength norms and vibrations of fishing vessels at the early stages of designing.

Keywords: Fishing vessel, hull design, mathematical models, strength, vibration

Введение

Анализ литературных источников показал, что определению минимальных толщин малых и средних рыболовных судов посвящена работа [1], вопросам оптимизации конструкции корпуса [2,3], методологии проектирования водоизмещающих судов [4,5], проектному обеспечению норм вибрации на рыболовных судах [6], проектированию рыболовных судов [7,9], математическим моделям определения частот корпуса судна [8], проектированию конструкции мидель-шпангоута [10], автоматизированному проектированию конструкции корпуса работа [11],

Проведенный анализ показал актуальность создания математических моделей для определения характеристик конструкции корпуса двухпалубных траулеров на ранних стадиях их проектирования.

Проблема оптимизации конструкции корпуса с учетом системного подхода к проектированию рыболовного судна связана с решением ряда задач:

- оптимизация конструкции корпуса на уровне подсистемы «Корпус» с учетом требований технического задания к проектируемому судну и принятых на его основе проектных решений для размещения подсистем и обеспечения заданной грузоподъемности судна;

1. Основная часть

В табл. 1. представлены соотношения основных элементов, коэффициенты общей полноты и водоизмещения поддесяти проектам средних двухпалубных траулеров, а в табл.2. характеристики конструкции мидель-шпангоута

- оптимизация конструкции корпуса с учетом требований количественной оценки необходимых запасов прочности и эксплуатационной надежности корпусных конструкций и удовлетворения требований РМРС;

- оптимизация конструкции корпуса с учетом требований обеспечения нормативных характеристик вибрации и исключения наличия резонансных колебаний корпуса;

Для решения задач оптимизации конструкции корпуса среднего двухпалубного траулера, с учетом требований количественной оценки необходимых запасов прочности и исключения наличия резонансных колебаний корпуса необходимо:

- выполнить анализ соотношения основных элементов, коэффициентов общей полноты и конструкции мидель-шпангоута траулеров;
- разработать алгоритм и математические модели определения элементов и характеристик траулера, удовлетворяющих нормам прочности;
- получить расчетные формулы для определения момента инерции и координат нейтральной оси поперечных сечений мидель-шпангоут средних двухпалубных траулеров;
- определить моменты инерции и частоты собственных колебаний корпуса двухпалубных траулеров;

использованные для разработки математических моделей. Также, были получены характеристики конструкции шпангоутов, для которых рассчитываются максимальные перерезывающие силы.

Таблица 1

Сопоставление соотношений основных элементов, коэффициентов общей полноты и водоизмещения средних двухпалубных траулеров

№ п/п	Тип судна	Соотношения основных элементов, коэффициент общей полноты, водоизмещение					
		$L_{\text{шп}}/B$	H/B	H/T	B/T	δ	D, m
1	СЕВРЫБА 2	3,81	0,600	1,42	2,37	0,674	2737
2	СЕВРЫБА 1	4,24	0,622	1,36	2,18	0,701	2356
3	НЕВЕЛЬСК	4,28	0,681	1,35	1,99	0,592	2870
4	ТАУРУС	4,26	0,622	1,33	2,14	0,574	2881
5	АРИУС	4,62	0,640	1,48	2,31	0,567	1860
6	НЕПТУН	4,16	0,625	1,33	2,12	0,634	2795
7	БАРЕНЦЕВО МОРЕ	4,00	0,685	1,83	2,67	0,575	1940
8	ОРЛЕНОК	3,98	0,667	1,77	2,65	0,609	2467
9	НОРВЕЖЕЦ	4,69	0,606	1,33	2,20	0,597	2597
10	ПРОЕКТ 13728	4,53	0,632	1,66	2,63	0,595	1760
Min значение		3,81	0,600	1,33	1,99	0,567	1760
Max значение		4,69	0,685	1,83	2,67	0,701	2881
Среднее значение		4,26	0,638	1,49	2,33	0,612	2426,3

Из табл. 1 видно, что, область проектных значений отношения L_{11}/B для средних двухпалубных траулеров имеет диапазон $3,81 \leq L_{11}/B \leq 4,69$, диапазон изменения отношения H/B составляет $0,600 \leq H/B \leq 0,685$, а отношения H/T составляет $1,33 \leq H/T \leq 1,83$. В соответствии с работой [9], область возможных значений параметра H/B лежит в диапазоне $0,566 < H/B < 0,654$. При значениях H/B близких к нижнему пределу качка усиливается, а при приближении к верхней границе, средние промысловые суда имеют большие поперечные

размеры B и H , что приводит к уменьшению длины судна и неблагоприятным для его ходкости пропорциям. Вместе с тем, такие поперечные размеры средних траулеров позволяют обеспечить их прочность. Область проектных значений B/T для средних промысловых судов составляет $1,99 \leq B/T \leq 2,67$. В соответствии с работой [9], область возможных значений параметра B/T лежит в диапазоне $2 \leq B/T \leq 3$.

Таблица 2

Сопоставление осредненных толщин листовых элементов конструктивного мидель-шпангоута по двум проектам средних двухпалубных траулеров

Тип судна	Осредненные толщины листовых элементов конструктивного мидель-шпангоута, мм						
	t_{∂}	$t_{\partial\partial}$	$t_{\partial n}$	t_{en}	t_{δ}	t_{en}	$t_{\partial c}$
ТСМ типа «ОРЛЕНОК»	8,79	10,33	6,17	8,68	10,85	15,0	11,0
СРТР типа «БАРЕНЦЕВО МОРЕ»	10,50	8,00	7,00	7,69	10,76	10,0	8,0
Средние значения	9,64	9,16	6,58	8,18	10,80	12,5	9,5
Расчетные значения	9,70	8,50	6,50	8,00	10,80	12	10

На рис.2 показана структурная схема алгоритма для определения характеристик прочности.

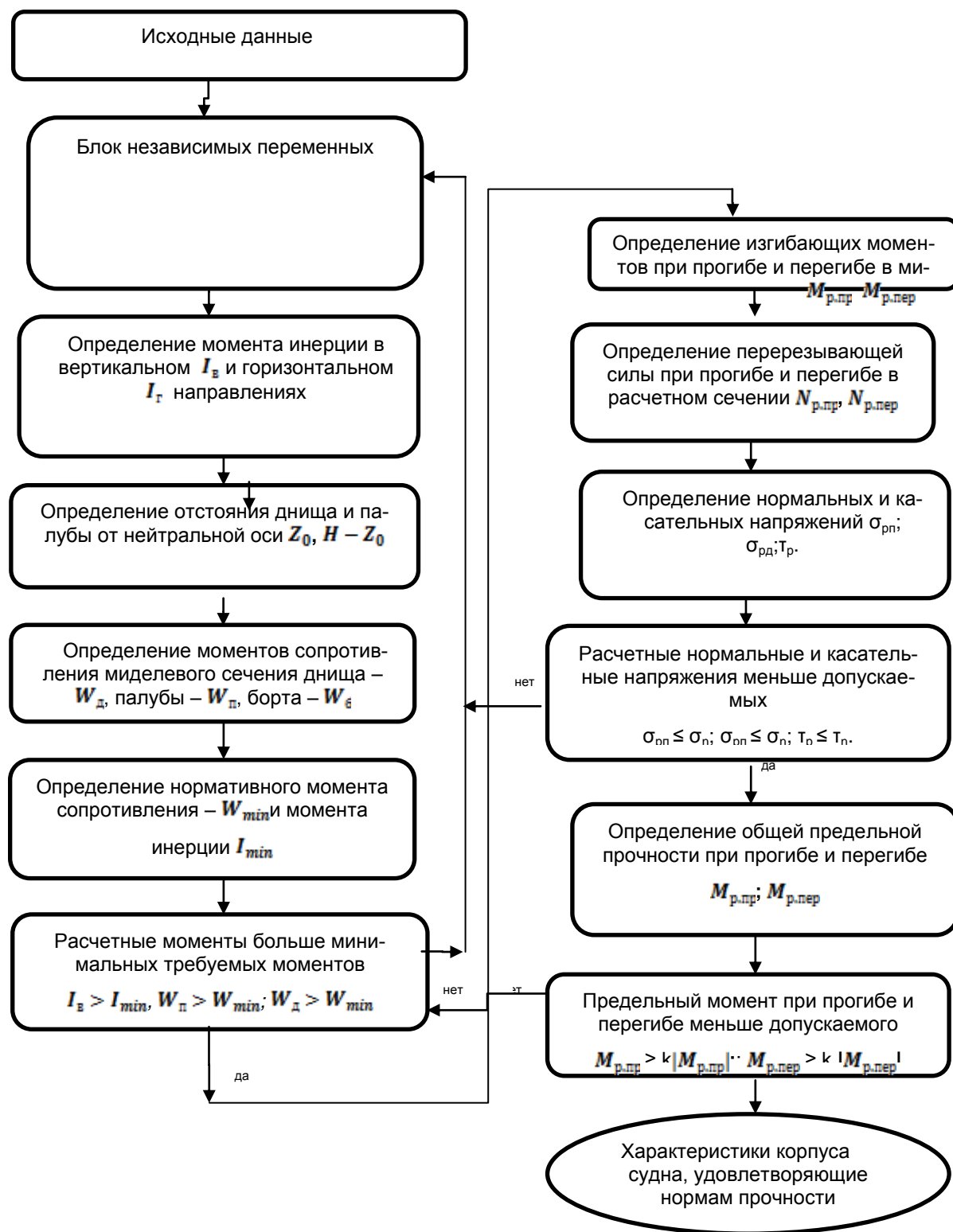


Рис. 2. Структурная схема алгоритма определения элементов и характеристик судна, удовлетворяющих нормам прочности

Для автоматизированного определения вертикальных и горизонтальных моментов инерции конструктивного мидель-шпангоута средних

рыболовных судов, используемых в качестве аналогов или прототипа, разработана математическая модель, имеющая вид:

$$I_z = 2(C - Az_0^2); \quad (1)$$

$$C = \frac{B}{2} t_{\partial} \left[k_1 \left(\frac{t_{\partial}}{2} \right)^2 + k_2 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} h_{\partial\partial}^2 + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n}^2 + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n}^2 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \right] + C_5, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{где } C_1 &= 2 \frac{l_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial}} (H_{\partial n} + h_{\partial\partial})^2; \quad C_2 = \frac{1}{2} \frac{(H_{\partial n} - h_{\partial\partial}) t_{\partial}}{B t_{\partial}} \left[(H_{\partial n} + h_{\partial\partial})^2 + \frac{1}{3} (H_{\partial n} - h_{\partial n})^2 \right]; \\ C_3 &= 2 \frac{h_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial}} \left(H_{\partial n}^2 + H_{\partial n} h_{\partial\partial} + \frac{1}{3} h_{\partial\partial}^2 \right); \quad C_5 = \sum_{i=1}^n A_i z_i^2; \\ C_4 &= \frac{1}{2} \frac{h_{\partial\partial}^3}{B} \left(\frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + k_3 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} \right); \quad k_1 = \cos \theta; \quad k_2 = 2 \frac{l_{\partial\partial}}{B}; \quad k_3 = \frac{h_{\partial\partial}}{h_{\partial n}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$B^* = \frac{B}{2} t_{\partial} \left[k_1 \frac{t_{\partial}}{2} + k_2 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} h_{\partial\partial} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n} + B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \right] + B_5, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{где } B_1 &= 2 \frac{l_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial}} (H_{\partial n} + h_{\partial\partial}); \quad B_2 = \frac{1}{B} \cdot \frac{t_{\partial}}{t_{\partial}} (H_{\partial n}^2 - h_{\partial\partial}^2); \\ B_3 &= 2 \frac{h_{\partial\partial}}{B} \cdot \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} \left(H_{\partial n} + \frac{1}{2} h_{\partial\partial} \right); \quad B_5 = \sum_{i=1}^n A_i z_i; \\ B_4 &= \frac{h_{\partial\partial}^3}{B} \cdot \left(\frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + k_3 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = \frac{B}{2} t_{\partial} \left(k_1 + k_2 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + 2 \frac{l_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial}} + 2 \frac{t_{\partial}}{t_{\partial}} \frac{H_{\partial}}{B} + 2 \frac{t_{\partial\partial} h_{\partial\partial}}{t_{\partial} B} + A_1 \right) + A_2, \quad (6)$$

где A_2 - суммарная площадь стенок связей набора; A_1 - сумма площадей вертикального киля, днищевых стрингеров и днищевой части обшивки, не вошедшей в площадь борта. Расчетные значения A_2 и A_1 имеют вид:

$$\begin{aligned} A_2 &= \sum_{i=1}^n A_i; \\ A_1 &= 2 \frac{h_{\partial\partial}}{B} \cdot \left(\frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + k_3 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

Координата нейтральной оси мидель-шпангоута имеет вид:

$$z_0 = \left(\frac{k_1 \frac{t_{\partial}}{2} + k_2 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} h_{\partial\partial} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} H_{\partial n} + B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + 2 \frac{B_5}{B t_{\partial}}}{k_1 + k_2 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + 2 \frac{l_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial}} + 2 \frac{t_{\partial}}{t_{\partial}} \frac{H_{\partial}}{B} + 2 \frac{t_{\partial\partial} h_{\partial\partial}}{t_{\partial} B} + A_1 + 2 \frac{A_2}{B t_{\partial}}} \right), \quad (8)$$

Момент инерции в горизонтальном направлении имеет вид:

$$I_z = \frac{B^2 t_{\partial}}{2} \left[\frac{1}{6} \left(k_1^3 + k_2^3 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial n}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial n}} + \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial n}} \right) + \frac{(H_{\partial n} - h_{\partial\partial}) t_{\partial}}{B t_{\partial n}} + \frac{h_{\partial\partial} t_{\partial\partial}}{B t_{\partial n}} + K_1 + K_2 + K_3 \right] + K_4, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{где } K_1 &= \frac{l_{\partial\partial} (B - l_{\partial\partial})^2 t_{\partial\partial}}{B^3 t_{\partial n}}; \quad K_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{l_{\partial\partial}}{B} \right)^3 \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}}; \\ K_3 &= \frac{4 h_{\partial\partial}}{B^3} \left(l_{\partial\partial}^2 \cdot \frac{t_{\partial n}}{t_{\partial}} + l_{\partial\partial}^2 \cdot \frac{t_{\partial\partial}}{t_{\partial}} \right); \quad K_4 = 2 \sum_{j=1}^n A_j z_j^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Вторая задача связана с разработкой математических моделей для определения моментов инерции в вертикальном и горизонтальном направлениях при вариационных исследовани-

ях. Алгоритм расчетного определения моментов инерции для миделевого сечения корпуса судна базируется на основании многофакторного регрессионного анализа, учитывающего зависимость центрального момента инерции кор-

пуса от главных элементов судна. Такая функциональная зависимость может быть разложе-

на в ряд Тейлора:

$$f(x_1, \dots, x_k) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i,j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_i x_i^2 + \dots, \quad (11)$$

где a_i - коэффициенты уравнения; $x_{i,j}$ - факторы.

Для определения моментов инерции конструктивного мидель-шпангоута выбраны соотношения $L_{\perp\perp}/B$, $L_{\perp\perp}/H$ и коэффициент δ , определяющие структуру регрессионного уравнения. В рамках автоматизированного определения мо-

ментов инерции конструктивного мидель-шпангоута в вертикальном (I_z) и горизонтальном (I_y) направлениях к расчетной длине судна ($L_{\perp\perp}$, м), а также координаты нейтральной оси z_0 , использованы зависимости имеющие вид:

$$\frac{I_z}{L_{\perp\perp}} = f\left(\frac{L_{\perp\perp}}{B}, \frac{L_{\perp\perp}}{H}, \delta\right); \quad (12)$$

$$\frac{I_y}{L_{\perp\perp}} = f\left(\frac{L_{\perp\perp}}{B}, \frac{L_{\perp\perp}}{H}, \delta\right); \quad (13)$$

$$z_0 = f(L_{\perp\perp}, B, H).. \quad (14)$$

Используя функциональную зависимость (11) в квадратичной степенной форме, получено уравнение регрессии для определения мо-

ментов инерции конструктивного мидель-шпангоута и координат нейтральной оси в следующем виде:

$$\frac{I_z}{L_{\perp\perp}} = f\left(\frac{L_{\perp\perp}}{B}, \frac{L_{\perp\perp}}{H}, \delta\right) = a_0 + a_1 \frac{L_{\perp\perp}}{B} + a_2 \frac{L_{\perp\perp}}{H} + a_3 \delta + a_4 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right]^2 + a_5 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right]^2 + a_6 \delta^2 + a_7 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right] \cdot \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right] + a_8 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right] \delta + a_9 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right] \delta; \quad (15)$$

$$\frac{I_y}{L_{\perp\perp}} = f\left(\frac{L_{\perp\perp}}{B}, \frac{L_{\perp\perp}}{H}, \delta\right) = b_0 + b_1 \frac{L_{\perp\perp}}{B} + b_2 \frac{L_{\perp\perp}}{H} + b_3 \delta + b_4 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right]^2 + b_5 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right]^2 + b_6 \delta^2 + b_7 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right] \cdot \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right] + b_8 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{B}\right] \delta + b_9 \left[\frac{L_{\perp\perp}}{H}\right] \delta; \quad (16)$$

$$z_0 = f(L, B, H) = c_0 + c_1 L_{\perp\perp} + c_2 B + c_3 H + c_4 L_{\perp\perp}^2 + c_5 B^2 + c_6 H^2 + c_7 (L_{\perp\perp} B) + c_8 (B H) + c_9 (L_{\perp\perp} H).. \quad (17)$$

Для решения этой системы уравнений, связанных с определением коэффициентов a_0, a_1, \dots, a_9 ; b_0, b_1, \dots, b_9 ; c_0, c_1, \dots, c_9 , выбраны 10 проектов промысловых траулеров. В табл.

2. представлены исходные данные для определения коэффициентов регрессии (в расчете эквивалентного бруса учитывается палуба бака).

Таблица 3

Расчетные данные для определения коэффициентов регрессии средних двухпалубных траулеров

№ п/п	Тип судна	Элементы и характеристики промыслового судна						
		$L_{\perp\perp}, \text{м}$	B, м	H, м	δ	$I_z, \text{м}^4$	$I_y, \text{м}^4$	$z_0, \text{м}$
1	СЕВРЫБА 2	51,50	13,50	8,10	0,674	5,76	13,79	3,30
2	СЕВРЫБА 1	50,50	11,90	7,40	0,701	4,20	9,70	2,98
3	НЕВЕЛЬСК	55,60	13,00	8,85	0,592	6,81	13,17	3,60
4	ТАУРУС	57,55	13,50	8,40	0,574	6,24	14,04	3,42
5	АРИУС	54,00	11,70	7,49	0,567	4,27	9,36	3,03
6	НЕПТУН	54,04	13,00	8,12	0,634	5,63	12,60	3,30
7	БАРЕНЦЕВО МОРЕ	52,00	13,00	8,90	0,575	6,90	13,21	3,63
8	ОРЛЕНОК	55,00	13,80	9,20	0,609	7,82	15,54	3,76
9	НОРВЕЖЕЦ	53,60	13,20	8,00	0,597	5,48	12,98	3,25
10	ПРОЕКТ 13728	48,60	12,50	7,90	0,595	5,10	11,30	3,21
Min значение		48,60	11,70	7,40	0,567	4,20	9,36	2,98

Мах значение	57,55	13,80	9,20	0,701	7,82	15,54	3,76
Среднее значение	53,24	12,91	8,24	0,612	5,82	12,57	3,35

Созданы три системы уравнений, первая для момента инерции I_{ε} , вторая для I_z и третья для z_0 . В результате решений этих систем уравнений получаем коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_9 ; b_0, b_1, \dots, b_9 ; c_0, c_1, \dots, c_9 , которые представлены в табл. 4 – 6 и формулы 15-17.

Таблица 4

Коэффициенты для определения вертикальных моментов инерции средних двухпалубных траулеров

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
-6,8	2,283	0,068	6,748	-0,211	0,062	0,883	-0,065	-0,15	-1,09

$$I_{\varepsilon} = \left[-6,8 + 2,283 \frac{L_{11}}{B} + 0,068 \frac{L_{11}}{H} + 6,748 \delta - 0,211 \left(\frac{L_{11}}{B} \right)^2 + 0,062 \left(\frac{L_{11}}{H} \right)^2 + 0,883 \delta^2 - 0,065 \left(\frac{L_{11}}{B} \right) \cdot \left(\frac{L_{11}}{H} \right) - 0,15 \left(\frac{L_{11}}{B} \right) \delta - 1,09 \left(\frac{L_{11}}{H} \right) \delta \right] L_{11} \pm \varepsilon_a, \quad (18)$$

Таблица 5

Коэффициенты для определения горизонтальных моментов инерции средних двухпалубных траулеров

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
-13,689	4,37	0,317	13,291	-0,4	0,112	1,98	-0,13	0,433	-2,109

$$I_z = \left[-13,689 + 4,37 \frac{L_{11}}{B} + 0,317 \frac{L_{11}}{H} + 13,291 \delta - 0,4 \left(\frac{L_{11}}{B} \right)^2 + 0,112 \left(\frac{L_{11}}{H} \right)^2 + 1,98 \delta^2 - 0,13 \left(\frac{L_{11}}{B} \right) \cdot \left(\frac{L_{11}}{H} \right) + 0,433 \left(\frac{L_{11}}{B} \right) \delta - 2,109 \left(\frac{L_{11}}{H} \right) \delta \right] L_{11} \pm \varepsilon_a, \quad (19)$$

Таблица 6

Коэффициенты для определения координаты нейтральной оси средних промысловых судов

c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
-2,282	-0,00034	0,45	0,23	0,00092	-0,017	-0,0018	-0,005	0,033	-0,0039

$$z_0 = -2,282 - 0,00034 L_{11} + 0,45 B + 0,23 H + 0,00092 L_{11}^2 - 0,017 B^2 - 0,0018 H^2 - 0,005 (L_{11} \cdot B) + 0,033 (B \cdot H) - 0,0039 (L_{11} \cdot H) \pm \varepsilon_k, \quad (20)$$

По известным значениям главных размеров и значениям I_B , I_H , определяют частоты собственных колебаний корпуса в вертикальном и горизонтальном направлениях по формулам (21) и (22), а также моменты сопротивления

$$\lambda_{1\varepsilon} = \frac{3,4}{\sqrt{1,2 + \frac{B}{1,7}}} \sqrt{\frac{EI_{\varepsilon}}{DL^2}}; \quad (21) \quad \lambda_{1z} = \frac{3,0}{\sqrt{1,3 + \frac{T}{1,8}}} \sqrt{\frac{EI_z}{DL^2}}; \quad (22)$$

Где: $\lambda_{1\varepsilon}$, λ_{1z} - частоты собственных колебаний корпуса по первому тону, в вертикальном и горизонтальном направлениях, Гц; I_{ε} , I_z - моменты инерции конструктивного мидельшпангоута, в вертикальном и горизонтальном

миделевого сечения верхней палубы W_n и днища W_d на ранних стадиях проектирования судна. Для автоматизированной оценки частот собственных колебаний корпуса предложены формулы, имеющие следующий вид:

направлениях, 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 .

В таблице 7. представлены частоты собственных колебаний корпуса и моменты сопро-

тивления, необходимые для оценки вибрации и прочности проектируемой конструкции корпуса.

Таблица 7

Расчетные значения частот и моментов сопротивления
средних двухпалубных траулеров

№ п/п	Тип судна	Частоты собственных колебаний и моменты сопротивления ВП и днища			
		$\lambda_{1в}, c^{-1}$	$\lambda_{1г}, c^{-1}$	$W_{п}, м^3$	$W_{д}, м^3$
1	СЕВРЫБА 2	4,336	6,957	1,199	1,747
2	СЕВРЫБА 1	4,179	6,450	0,952	1,409
3	НЕВЕЛЬСК	4,243	5,864	1,299	1,891
4	ТАУРУС	3,798	5,763	1,254	1,826
5	АРИУС	4,241	6,469	0,957	1,412
6	НЕПТУН	4,029	6,087	1,169	1,703
7	БАРЕНЦЕВО МОРЕ	5,421	8,015	1,309	1,903
8	ОРЛЕНОК	4,713	7,084	1,437	2,082
9	НОРВЕЖЕЦ пр.3090	4,150	6,500	1,155	1,687
10	ПРОЕКТ 13728	5,435	8,610	1,088	1,593
Min значение		3,798	5,763	0,952	1,409
Max значение		5,435	8,610	1,437	2,082
Среднее значение		4,455	6,780	1,182	1,725

Для определения частот собственных вертикальных и горизонтальных колебаний корпуса

$$\lambda_{iв} = k_{iв} \cdot \lambda_{1в}, \quad (23) \quad \lambda_{iг} = k_{iг} \cdot \lambda_{1г}, \quad (24)$$

Где: $\lambda_{1в}, \lambda_{1г}$ - частоты собственных колебаний корпуса тонов, в вертикальном и горизонтальном направлениях, Гц; i - номер тона; $k_{iв}$ - коэффициенты для вертикальных колебаний ($k_{2в}=2,15$; $k_{3в}=3,4$) и $k_{iг}$ - коэффициенты для горизонтальных колебаний ($k_{2г}=2,1$; $k_{3г}=3,2$).

высших тонов получены расчетные зависимости, имеющие следующий вид:

Определив частоты собственных колебаний корпуса траулера, проводят оптимизацию подсистем «Корпус -энергетический комплекс - гидродинамический комплекс». По результатам вариационных исследований определяют варианты соответствующие требованиям прочности и отсутствия резонансных режимов для первых трех тонов колебаний корпуса.

Заключение

1. Определены соотношения основных элементов и коэффициентов общей полноты средних двухпалубных траулеров, а также осредненные толщины листов конструктивного мидельшпангоута, позволяющие перейти к вариационному исследованию оптимальных характеристик конструкции корпуса этих судов

2. Разработана математическая модель, позволяющая в автоматизированном режиме определить центральные моменты инерции и координаты нейтральной оси миделевого сечения корпуса среднего двухпалубного траулера.

3. Разработаны математические модели, позволяющие в автоматизированном режиме определить центральные моменты инерции и координаты нейтральной оси миделевого сечения корпуса и частоты его собственных колебаний при проведении вариационных исследований, связанных с обеспечением норм прочности и исключения резонансных колебаний корпуса среднего двухпалубного траулера.

4. Определены ожидаемые частоты собственных колебаний корпуса для известных проектов средних двухпалубных траулеров.

Литература

1. Беленький Л.М., Семенов Л.Н. К определению минимальной толщины изношенной обшивки промысловых судов малых и средних размерений. – Л.: Судостроение, № 5. – С 4-8.
2. Бойцов Г.В. Проблемы оптимизации судового корпуса / Г.В. Бойцов. - Л.: Судостроение, 1983, №2. - С. 5-8.
3. Бойцов Г.В. Оптимизация судового корпуса с учетом требований снижения его металлоемкости и трудоемкости сборки / Г.В. Бойцов. - Л.: Судостроение, 1984, № 3. - С. 7-9.
4. 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.
5. 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.
6. Дятченко С.В. Теоретические положения проектного обеспечения норм вибрации на судах промыслового флота / С.В. Дятченко. - Известия КГТУ, Калининград, 2012. - № 25. - С.119-126.
7. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учебник /А.П. Иванов – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010.- 275 с.
8. Постнов В.А. Вибрация корабля / В.А. Постнов, В.С. Калинин, Д.М. Ростовцев. – Л.: Судостроение, 1983. -248 с.
9. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов. - Л.: Судостроение, 1981. - 376 с.
10. Тряскин В.Н. Проектирование конструктивного мидель-шпангоута морских транспортных судов. Учебное пособие. - Л.: изд. ЛКИ, 1986.- 102 с.
11. Тряскин В.Н. Методологические основы автоматизированного параметрического проектирования конструкции корпуса судна / В.Н. Тряскин. - СПб.: Судостроение, 2007. – С. 9-11.

References

1. Belenky LM, Semenov L.N. To the determination of the minimum thickness of the worn out skin of fishing vessels of small and medium dimensions. Spb., Shipbuilding, № 5, p.p. 4-8.
2. Boytsov G.V. Problems of optimization of the ship's hull. Spb., Shipbuilding, 1983, №2, p.p.5-8.
3. Boytsov G.V. Optimization of the ship's hull, taking into account the requirements for reducing its metal consumption and labor-consuming assembly. Spb., Shipbuilding, 1984, № 3, p.p.7-9.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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. Postnov VA Vibration of the ship. Spb., Shipbuilding, 1983, 248 p.
9. Rakov A.I. Design of fishing vessels. Spb., Shipbuilding, 1981, 376 p.
10. Tryaskin V.N. Designing a constructive midship frame of marine transport vessels. Textbook. Spb., LCI, 1986, 102 p.
11. Tryaskin V.N. Methodological foundations of the Automated parametric design of hull structure. Spb., Shipbuilding, 2007, p.p. 9-11.

УДК 629.12.001.57

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ МАЛОТОННАЖНЫХ И НАЛИВНЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Владимир Павловичт Иванов

доктор технических наук, профессор кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: dtn.ivanov@yandex.ru

Станислав Дмитриевич Дудин

аспирант кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр.
e-mail: dudbravo@mail.ru

Зыюнг Ван Тхань

аспирант кафедры кораблестроения
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр.
e-mail: duongvthanh@gmail.com

Аннотация

Рассмотрен значительный объем результатов статистической обработки данных по современным малотоннажным и среднетоннажным рыболовным судам (РС), включая характеристики их обводов, комплектующего оборудования, объемные и массовые составляющие и параметры уравнений проектирования. Исходные материалы для анализа, ограниченные по зарубежным судам, восполнены результатами их реконструирования. Представлены обобщения, которые значительно сокращают существующую неопределенность в значениях проектных характеристик и параметров для задач проектировании отечественных РС нового поколения. Одновременно известное разнообразие РС по их размерам, архитектуре, особенностям их назначения, а также по технико-экономическим условиям их эксплуатации, весьма ограничивает использование статистического метода проектирования этих судов или т.н. проектирование «с чистого листа». Практически значимым по-прежнему представляется классический метод последовательных приближений с предваряющим выбором исходного судна-претендента из числа наиболее положительно зарекомендовавших себя судов, с использованием аппарата математического моделирования РС и их эксплуатации и других современных информационных технологий.

Ключевые слова: рыболовные суда наливного и сухогрузного типов, реконструирование, технические характеристики, параметры и уравнения проектирования, статистический анализ.

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF MODERN SMALL TONNAGED FISHING VESSELS AND WITH WET-TYPE STORAGE FOR THE PURPOSES OF PRELIMINARY DESIGN

Vladimir Ivanov

Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of ship design
Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Stanislav Dudin

PhD student of department of ship design
Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: dudbravo@mail.ru,

Duong Van Thanh

PhD student of department of ship design
Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: duongvthanh@gmail.com

Abstract

The significant amount of results from statistical analysis of data on modern small and middle tonnage fishing vessels (FV) is considered, including characteristics of their hull lines, installed equipment, volumetric and mass components and parameters of design equations. The initial set of materials, restricted for the foreign vessel, are supported by the results of their reconstruction. Some generalizations are introduced, which significantly reduce the current amount of uncertainty in terms of design parameters and characteristics for the purpose of designing native fishing vessels of a new generation. Simultaneously, the known variety of FV in their dimensions, architecture, features and purpose, and technico-economic conditions of their operation, could restrict the utilization of statistical ship design of such vessels (or, so called, design "from scratch"). The traditional method of successive approximations is still recognized as of high practical importance with making a choice of a basis-ship from a set of proven ones with utilization of mathematical modeling of fishing vessels, their operations and other means of information technologies.

Key words: fishing vessels with tanks and holds for storage of cargo, reconstruction, technical characteristics, parameters and design equations, statistical analysis.

Введение

В настоящее время проектирование новых отечественных рыболовных судов (РС) предполагает изучение и анализ проектных и других технических характеристик современных зарубежных судов, отражающих научно-технические достижения в промышленном рыболовстве и промысловом судостроении в целом, а также опыт их проектирования и эксплуатации. Целью данной статьи является статистический анализ и отработка соответствующих обобщений для ряда проектных параметров и других характеристик современных малотоннажных и среднетоннажных РС традиционного (сухогрузного) и наливного типов.

В качестве исходного материала для выполнения анализа и обобщений использованы база данных [1] и другие материалы, полученные из периодической печати, аналитических обзоров и сайтов проектно-конструкторских организаций в интернете. Для восполнения известной ограниченности технических характеристик, представляемых по зарубежным судам, по методике, изложенной в [2] и [3], выполнено реконструирование ряда таких судов (частично - в рамках исследовательского курсового и дипломного проектирования КГТУ). В их числе 6 малотоннажных сухогрузных РС (МРС) длиной от 15 до 26 м и водоизмещением D от 200 до 600 т, и более десятка среднетоннажных РС наливного типа (НРС) длиной от 23 до 70 м ($250 < D < 5000$ т). При реконструировании воссозданы теоретические чертежи (ТЧ) этих судов, выполнены расчеты гидростатических кривых, построены эпюры емкости с детализированной разбивкой основного корпуса на помещения в соответствии с опубликованными схемами общего расположения этих судов. Далее, с использованием математической модели эксплуатации РС (ММЭРС, см. [4]), выполнено

виртуальное согласование условий их функционирования в соответствующих условиях промысла. В результате для рассмотренных РС получены оценки значений проектных параметров и других характеристик, необходимых для корректного статистического анализа и соответствующих проектных обобщений.

В рамках представляемого материала рассмотрен ряд характеристик комплектующего оборудования современных РС и формы их обводов, а также параметров уравнений проектирования, включающих в себя относительные объемные, массовые и ресурсные составляющие. При этом учтено, что в результате статистического анализа случайных величин для задач проектирования необходимы не только их средние значения \bar{y} и аппроксимирующие регрессионные зависимости $y=f(x)$, легко получаемые с использованием компьютерных редакторов, но и дисперсионные характеристики, определяющие характер регрессий и их приемлемость для выбора проектных решений (см. [5], гл.6). Полученные регрессии демонстрирует качественную и лишь оценочную (приближенную) количественную связь функции и ее аргументов. Их использование для расчета элементов судна в рамках статистического метода проектирования, зачастую привлекаемого проектантов своей простотой, представляется недопустимым без установления не только тесной корреляционной связи ее составляющих, но и малых значений их среднеквадратичного отклонения σ , определяющего степень рассеивания статистических данных относительно полученных регрессий. Заметим, что оценку степени рассеивания удобно оценивать значением коэффициента вариации $\delta_v = \sigma / \bar{y}$.

Рассмотрим характерные особенности современных РС.

1. Архитектурно-конструктивные типы РС

По архитектурно-конструктивному типу (АКТ) для отечественных МРС наиболее характерным является МРТК «Балтика», назначение которого - траловый лов рыбы при кормовой схеме траления и хранение улова в ящиках в охлажденном виде. Как известно, это 22-метровое однопалубное дизельное судно водоизмещением $D=174$ т, с наклонным форштевнем, баком, носовой рубкой, кормовой промышленной палубой и слипом. Машинное отделение (МО) размещается в средней части судна. Мощность главного двигателя $N_{gd}=220$ кВт, а вспомогательных дизель-генераторов $N_{dg}=32$ кВт. Гребной винт в насадке. Рыбный трюм над туннелем гребного вала смещен в корму от миделя. 6 членов экипажа размещены в носовой части судна. В свое время эти суда были достижением отечественного малотоннажного промыслового судостроения.

Вместе с тем, в течение последних двух-трех десятилетий в мировом промышленном рыболовстве проявился большой интерес к рыболовным судам наливного типа. В ходе эксплуатации выявились преимущества этих судов в части сохранения кондиционных качеств улова и повышения уровня механизации работ при его приеме на борт и сдаче на берег. Это побудило отечественных судовладельцев к модернизации действующих МРТК, часть которых переоборудована в наливные суда с сохранением их АКТ и мощности.

Развитие зарубежного рыболовного флота осуществлялось в ходе проектирования и постройки РС как сухогрузного, так и наливного типов. Из общих особенностей современных РС рассматриваемых классов (МРС и НРС) отметим их высокую энерговооруженность, сочетаемую с полнотой обводов. Повсеместно используются носовая бульба, подруливающие устройства, гребной винт в стационарной или поворотной насадке, а также компактное кормовое размещение МО. С целью повышения экономической эффективности судов за счет повышения стоимости продукции промысла, часть РС оснащается рыбообрабатывающим цехом с соответствующим увеличением экипажа и требуемого объема жилых и производственных помещений. В этом случае на МРС бак удлиняют (схему его общего расположения (ОР) см. рис. 1), а зачастую выполняют П-образным, с доведением его крыльев до кормы, что защищает экипаж с бортов от воздействия ветра и волн (см. рис. 2).

Развитием в обеспечении дополнительных объемов помещений на МРС являются двухпалубные суда (см. рис. 3). В целом на МРС их АКТ, а вслед за ними и промысловые схемы работы с орудиями лова, характерны своим разнообразием, что определяет необходимость их классификации.

АКТ среднетоннажных НРС может быть определен более устоявшимся (см. рис. 4). Характерными его элементами являются наличие двух палуб, бака, юта или двухъярусной надстройки с

рубкой, смещенной в корму от миделя. Разделенные наливные танки размещаются в средней части судна.

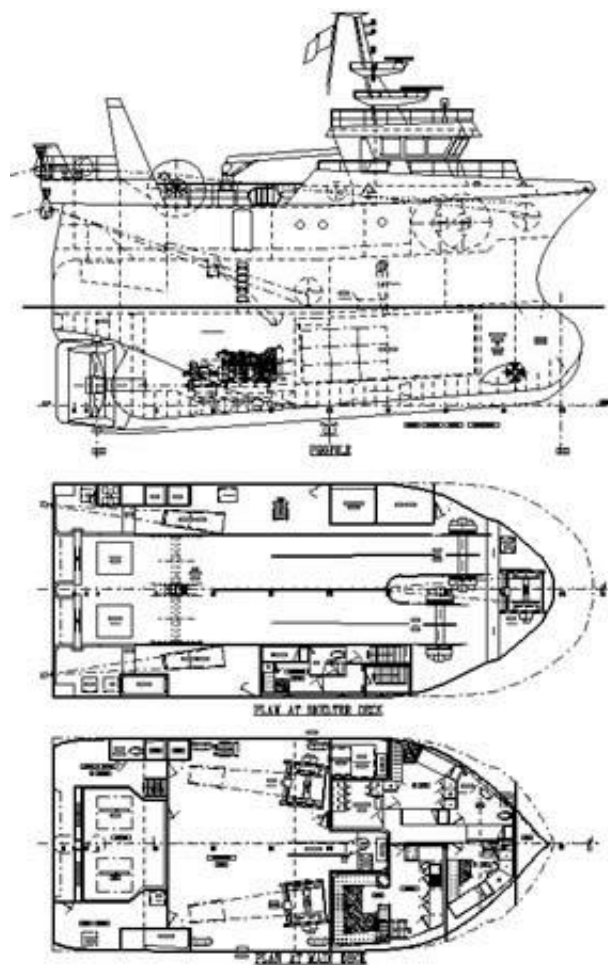


Рис 1. Схема ОР 20-метрового кормового траулера

2. Энерговооруженность современных РС

Мощность (кВт) механизмов судовой энергетической установки (СЭУ) РС определяется мощностью главных двигателей (ГД) N_{gd} , вспомогательных дизель-генераторов (ВДГ) N_{dg} , валогенераторов (ВГ) N_{wg} и их суммой $N_s = N_{gd} + N_{dg} + N_{wg}$ (суммарная мощность механизмов СЭУ). При анализе характеристик СЭУ выделяют также мощность ее судовой электростанции (СЭС) $N_{ses} = N_{dg} + N_{wg}$ и сумму $N_{gdd} = N_{gd} + N_{dg}$, определяющую для рассматриваемых РС длину (l_{mo} , м) и объем (V_{mo} , м³) помещений машинного отделения (МО). Относительные значения (коэффициенты) энерговооруженности РС получают при делении значений мощности на водоизмещение D (например, N_{gd}/D).

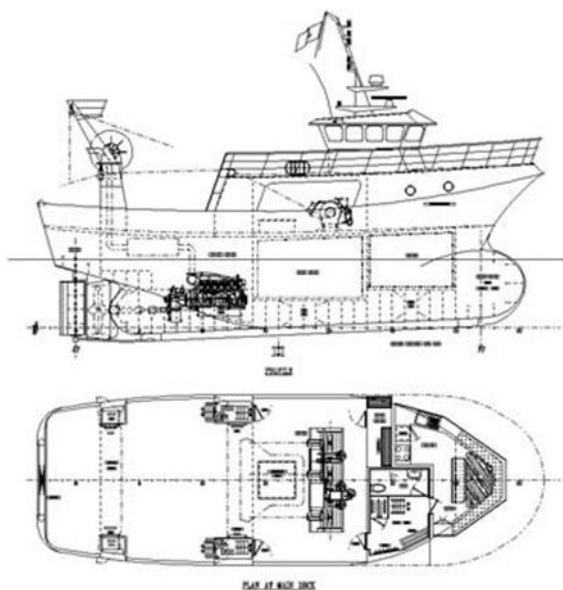


Рис. 2. Схема ОР 27,5-метрового морозильного траулера

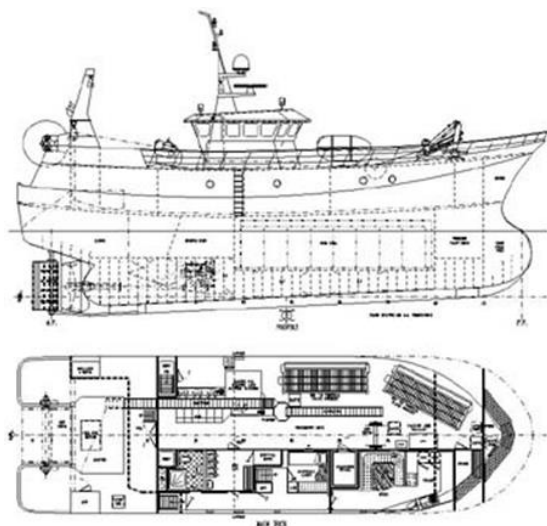


Рис. 3. Схема ОР 23,95-метрового 2-х-палубного кормового траулера

Для НРС оценка средних значений означенных мощностей может быть осуществлена в зависимости от длины судна $L_{p,m}$: $N_{gd} = 9.52L_p^{1.4984}$; $N_{gdd} = 16.97L_p^{1.4175}$; $N_s = 12.31L_p^{1.5584}$, или от его водоизмещения D , т: $N_{gd} = 7.79D^{0.7682}$, $N_{gdd} = 723 + 1.346D$; $N_s = 3.521D^{0.93}$. Осредненное соотношение этих мощностей составляет 1:1,34:1,68.

Средние значения энерговооруженности современных НРС значительно превышают аналогичные показатели отечественных РС и могут быть оценены следующими регрессиями: $N_{gd}/D = 1.45 - 0.6D/10^4 \pm 0.12$ ($\bar{y} = 1.30$ и $\delta_v = 30\%$); $N_{gdd}/D = 2.089 - D/10^4 \pm 0.56$ ($\bar{y} = 1.66$ и $\delta_v = 34\%$); $N_s/D = 2.52 - D/10^4 \pm 0.25$ ($\bar{y} = 2.27$ и $\delta_v = 12\%$).

Относительная электровооруженность НРС стабильна при среднем ее значении $N_{ses}/N_{gd} = 0,68$. При этом в качестве источников электроэнергии на малых судах преобладают ВДГ, которые при росте размеров судов все более заменяются ва-

логенераторами, мощность которых позволяет вырабатывать до 60% электроэнергии судна.

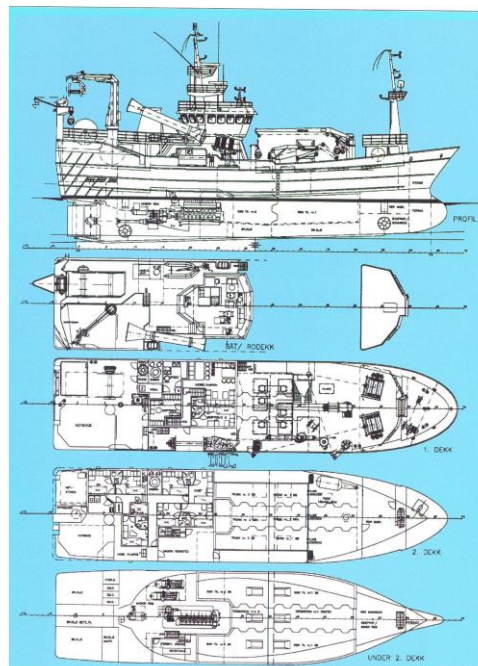


Рис. 4. Схема ОР рыболовного судна наливного типа (НРС)

Главным потребителем электроэнергии на РС (см. гл.2 в [6]) является технологическое оборудование для обработки и хранения улова. На НРС наиболее значимым и постоянным потребителем электроэнергии является рефрижераторная установка для охлаждения рыбных танков. Для оценки ее мощности N_{ref} , кВт, получены эмпирические формулы в зависимости от объема рыбных танков W_{tr} , м³: $N_{ref} = 369,34e^{0.8W_{tr}/1000}$ и $N_{ref}/W_{tr} = 2.384W_{tr}^{-0.125} \pm 0,28$ при $\bar{y} = 1.04$ и $\delta_v = 27\%$. Значимый разброс этих данных объясняется температурными условиями плавания и стремлением к запасу производительности по холоду при больших уловах, достигающих порой сотен тонн за траление или замет невода.

Важным потребителем электроэнергии являются и промышленные механизмы во время подъема трала, а также при его регулировке в режиме траления. Однако отметим эпизодичность этих энергоемких операций и их электрообеспечение с использованием ВГ как составных элементов в гибких схемах СЭУ современных РС.

Мощность главных механизмов СЭУ определяет длину МО (l_{mo} , м), которое на современных зарубежных РС размещается в корме и выгодно отличается своей компактностью от традиционных отечественных судов. Для оценки l_{mo} получены следующие регрессии: $l_{mo} = 0,128N_{gdd}^{0.5579}$ и $l_{mo} = 0,1674N_s^{0.5579}$ (заметим, что первая формула имеет более высокий коэффициент корреляции), а также $l_{mo}/N_{gdd} = 0,051 - 0.4N_{gdd}/10^6 \pm 0.00025$ при $\bar{y} = 0.0032$ и $\delta_v = 8\%$.

Для девяти сухогрузных МРС с ограниченным перечнем соответствующих исходных данных, по мощности СЭУ получены следующие регрессии:

$N_{gd}=6,7664L_p^{1.5208}\pm 277$; $N_{gd}=6,0768D^{0.8124}\pm 214$; $N_s=10,241L_p^{1.4597}\pm 334$; $N_s=6,0343D^{0.8448}\pm 269$. В целом же у этих судов длиной от 15 до 26 м диапазон используемой N_{gd} находится в пределах от 370 до 1470 кВт (на 75-метровом БМРТ типа «Кронштадт» N_{gd} соответствует указанному верхнему пределу при энерговооруженности судна $N_{gd}/D=0.4$). Отметим также, что для этих судов приведены значения тяги на винте P_t , т. В результате обработки этих данных определена их тесная корреляционная связь с мощностью судна: $P_t=1.42+0.017N_{gd}$. Для относительной тяги винта $P_{in}=P_t/N_{gd}$ получены выражения: $P_{in}=0,022-3N_{gd}/10^6\pm 0.0016$ ($\bar{y}=0.02$ и $\delta_y=7,8\%$) и $P_{in}=0,02-3(N_{gd}/D)/10^4\pm 0.0016$.

Материалы, представленные по мощности СЭУ, однозначно свидетельствуют о том, что доминирующим фактором при ее выборе является достижение высоких уловов. Это достигается, в первую очередь, увеличением мощности и тяги судна на тралении, которые должны соответствовать состоянию сырьевой базы района промысла. Соответственно мощность судна на тралении определяется в качестве одного из узловых пунктов технического задания (ТЗ) на проектирование современного РС, а его ходовые качества (в частности – скорость свободного хода) оказываются менее значимыми, чем традиционно считалось ранее. Заметим также, что предваряющий выбор N_{gd} уточняет промысловые возможности РС, что позволяет более осознанно определять технологический процесс освоения и сохранения улова и состав технологического оборудования. Кроме того, в рамках системы уравнений проектирования значительная часть масс и объемов судна, связанных с N_{gd} , переводится в категорию независимых величин, что существенно упрощает решение этой системы.

3. Главные размерения и форма корпуса современных РС

Из ряда геометрических характеристик РС рассмотрим их главные размерения (длину между перпендикулярами L_p (м) и по конструктивной ватерлинии (Квл) L_k , ширину B , высоту борта до нижней H_n и верхней H_v палубы, осадку T) и их соотношения, а также основные коэффициенты полноты: общей $\delta=V/(L_pBT)$ (здесь V , м³, – объемное водоизмещение), мидель-шпангоута β и конструктивной ватерлинии $\alpha=S_{квл}/(L_kB)$. Заметим, что эти данные определяют значения других коэффициентов полноты: продольной $\phi=\delta/\beta$ и вертикальной $\chi=\delta/\alpha$.

В соответствии с [7], в качестве расчетной длины судна принята длина L_p , м. Она измеряется от оси баллера руля (или поворотной насадки) до пересечения форштевня с конструктивной ватерлинии (при наличии носового бульба это кормовая точка сопряжения бульба и линии форштевня). Статистический анализ соотношения $K_l=L_k/L_p$ для всех РС показывает снижение его значений с ростом длины судна: $K_l=1,054-L_p/10^4\pm 0,02$. Среднее его значение может быть

принято равным $K_l=1,05$. При размещении в корме гребного винта в поворотной насадке значение этого коэффициента увеличивается на 5-6%.

Из числа обобщенных характеристик судна выделим его расчетное водоизмещение D , т (при снятии судна с промысла с полным грузом рыбной продукции и судовыми запасами, необходимыми для возвращения в порт), а также его кубический модуль L_pBH , м³ и длину L_p . Для оценки длины могут быть использованы следующие степенные зависимости: $L_p=1.4075D^{0.45}\pm 3.3$ для НРС и $L_p=1.3042D^{0.4721}\pm 1.6$ для МРС. Отметим, что для малых судов характерен существенный разброс данных. Но по своей форме регрессии идентичны, что свидетельствует об идентичности подхода при формировании длины для обеих групп судов.

О поперечных размерах судов. Регрессия для высоты борта НРС определяет достаточно стабильные результаты: $H=2.94+0.0943L_p\pm 0.2$ при $\delta_y=2.7\%$. Регрессия для высоты борта МРС не приводится с учетом отмеченного ранее разнотипа АКТ этих судов, необходимости их классификации с учетом количества палуб, а также минимальной высоты надводного борта, допускаемой соответствующими правилами для зарубежных РС. В последующем анализе значения высоты борта МРС определяются в пределах его основного корпуса.

Касательно ширины судна отметим, что для нее регрессионные зависимости для НРС и МРС оказываются близкими, но характерны значимым рассеиванием данных. Для ее оценки можно использовать выражения $B=8,02+1.4D/10^3\pm 0.4$ для НРС и $B=6.0+5D/10^3\pm 0.55$ для МРС.

Осадка у НРС с их относительно тяжелым грузом существенно больше, чем у РС сухогрузного типа. Ее величина может быть оценена выражениями $T=3.8+0.9D/10^3\pm 0.6$ для НРС и $T=2.2+3D/10^3\pm 0.22$ для МРС.

Для задач проектирования больший интерес представляют не абсолютные, а относительные характеристики судна. Для НРС, с их практически устоявшейся архитектурой, значения соотношений главных размерений судна относительно стабильны и их рассеивание, как правило, не превышает 5% ($\delta_v\leq 0,05$): $L_b=L_p/B=0.5265D^{0.2609}\pm 0.16$ при $\bar{y}=3,49$; $B_t=B/T=1.708+0,3D/10^4\pm 0.09$ при $\bar{y}=1,82$; $H_t=H/T=1.21-0,7D/10^6\pm 0.03$ при $\bar{y}=1,18$; $H_b=H/B=0.71-0,2D/10^4\pm 0.02$ при $\bar{y}=0,63$; $l=L_p/V^{1/3}=0.782D^{0.1924}\pm 0.12$ при $\bar{y}=3,57$. Отметим, что при анализе не обнаружено наличие практической связи относительной длины судна l с его скоростными характеристиками, в частности – со значениями чисел Фруда.

Для МРС такие же соотношения оказываются не стабильными (значения δ_v находятся в пределах 15-25%): $L_b=2,08+0.0016D\pm 0.32$ при $\bar{y}=2,66$; $B_t=2,5-4D/10^4\pm 0.24$ при $\bar{y}=2,34$; $H_t=1,61-3D/10^4\pm 0.24$ при $\bar{y}=1,42$; $H_b=0,651-D/10^5\pm 0.15$ при $\bar{y}=0,675$.

Для обеспечения работы судна с орудиями лова и их оснасткой, форма кормы РС принимается близкой к транцевой. Соответственно форма Квл у МРС с малыми значениями их удлинения

может быть названа уютнообразной. Для этих судов характерны стабильно высокие значения коэффициента $\alpha=0,9\pm0,01$, практически не зависящие ни от водоизмещения судна D , ни от его энерговооруженности $N_D=N_{gd}/D$, отражающей скоростные качества судна. У НРС значения α также не зависят от N_D , но уменьшаются в соответствии с регрессией $\alpha=0,9-D/10^5$ при среднем значении $\alpha=0,87$ и значимом увеличении рассеивания своих значений ($\sigma=\pm0,03$).

Коэффициенты полноты мидель-шпангоута у всех рассмотренных судов высокие и составляют для МРС $\beta=0,89\pm0,05$ и $\beta=0,92\pm0,02$ для НРС.

Высокие значения коэффициентов α и β обуславливают высокие значения и коэффициентов общей полноты δ , которые для МРС составляют $\delta=0,64\pm0,02$. Для НРС определена взаимосвязь значений δ с относительной длиной судна ($\delta=0,72-0,0285\pm0,01$) и (слабая) с числами Фруда ($\delta=0,73-0,3222F\pm0,18$ при $\delta_v=0,29$) при средних значениях $\delta=0,615\pm0,02$. Соответственно для МРС и НРС значения коэффициентов вертикальной и продольной полноты изменяются в пределах $\chi=0,71\pm0,03$ и $\phi=0,72\pm0,04$ и практически не зависят от размеров судна.

Отметим, что появление новых современных РС рассматриваемых классов с элементами новых концепций при их разработке (например, с использованием дизель-электрической или газомоторной СЭУ) неизменно приведет к новым конструктивным решениям и, как следствие, к расширению диапазона рассмотренных характеристик.

Материалы, представленные по характеристикам формы, определяют возможность анализа ряда характеристик остойчивости РС, что, в свою очередь, позволяет установить рекомендуемый вид его уравнения для задач проектирования.

4. О характеристиках остойчивости современных МРС и НРС

Как известно, в современной практике проектирования судов используют три основных вида уравнений начальной остойчивости:

1. классический (по Л. Эйлеру, [5]): $h=q_1T+q_2B^2/T-\zeta H$, где h – начальная метацентрическая высота (МВ), м, ζ – относительная аппликата центра тяжести (ЦТ) судна ($\zeta=Z_g/H$); q_1 и q_2 – коэффициенты уравнения остойчивости, определяемые значениями δ и α или $\chi=\delta/\alpha$: $q_1=1,017\alpha/(\alpha+\delta)$; $q_2=1,032\alpha^2/(12\delta)$. По числу используемых размерений судна, уравнение образует четырехмерное пространство, что осложняет проектные расчеты;

2. в виде относительной МВ ([5]): $h_b=h/B=q_1/B_1+q_2B_1-\zeta H/B_1$. По своему характеру это уравнение параметрическое. Статистические значения параметра h_b используются при проектировании крупных транспортных судов;

3. в виде модификации уравнения Л. Эйлера (по Н.Б.Севастьянову), когда $Z_c=g$ и производная $dZ_m/dT=q_1-q_2(B/T)^2=0$ (т.е. h и $Z_m\neq f(T)$). Благодаря исключению осадки судна пространство сокра-

щается до трехмерного, что соответственно упрощает проектные расчеты. При этом отношение B_1 принимает минимальное (критическое) значение $B_{tkp}=(q_1/q_2)^{0,5}$, а с учетом формул для $q_{1,2}$: $B_{tkp}=[11,826\delta/(\alpha(\alpha+\delta))]^{0,52}=3,439[\chi/(\alpha+\delta)]^{0,5}$. Соответственно, уравнение начальной остойчивости принимает вид: $h=B(q_1/B_{tkp}+q_2B_{tkp})-\zeta H=2B(q_1q_2)^{0,5}-\zeta H=q_3B-\zeta H=B(q_3-\zeta H/B_1)$, где $q_3=2(q_1q_2)^{0,5}$, $q_3B=Z_m$.

По [8] уравнение остается практически значимым при условии $B_1=B_{tkp}\pm0,5$, и ему удовлетворяет значительная часть отечественных РС (см. [6]).

Отметим также, что целый ряд характеристик остойчивости определяется формой корпуса и не зависит от нагрузки судна и аппликаты его ЦТ Z_g . К таковым относятся соотношения коэффициенты уравнений остойчивости q_1 , q_2 , q_3 и характеристики b_{tkp} , h_{kr} и Z_{gkr} . Сравнение фактических значений B_1 с B_{tkp} позволит осуществить рациональный выбор уравнения остойчивости для соответствующих типов РС.

Как установлено выше, для сухогрузных МРС характерны значения $\delta=0,62...0,66$ и $\alpha=0,89...0,91$, что определяет значения B_{tkp} в пределах 2,3...2,4. Фактические значения B_1 соответствуют условию $B_1=B_{tkp}\pm0,5$, что позволяет в составе системы уравнений проектирования использовать уравнение остойчивости в третьей форме (по Н.Б.Севастьянову). Алгоритм для цикла расчетов размерений судна в данной системе (в рамках метода последовательных приближений и при выбранных значениях относительной длины судна l и коэффициентов его полноты) предполагает (см. гл.5 в [6]):

- определение длины судна $L_p=l\cdot V^{1/3}$ и произведений $BT=V/L_p\delta$ (из уравнения плавучести) и $BH=H_{to}BT$ (здесь H_{to} – предварительное значение H_t , принимаемое по прототипу),

- преобразование уравнения остойчивости $h=q_3B-\zeta H$ в формы $\zeta H+h-q_3B=0$ и $\zeta H^2+hH-q_3(BH)=0$,

- последующее решение полученного квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} H &= -h/(2\zeta) \pm [(h^2/(4\zeta^2) + q_3BH/\zeta)]^{1/2} = \\ &= -h/(2\zeta) + [(h^2 + 4\zeta q_3BH)/(4\zeta^2)]^{1/2} = \\ &= [(h^2 + 4\zeta q_3BH)^{1/2} - h]/(2\zeta), \end{aligned}$$

- расчеты $B=(BH)/H$ и $T=V/(L_pB\delta)$.

Для НРС значения $\delta=0,59...0,63$ и $\alpha=0,84...0,90$, что определяет значения B_{tkp} в пределах 2,3...2,5. Фактические значения B_1 у этих судов ($\bar{y}=1,82$), характерных относительно большой осадкой, значительно меньше критических. При этом соотношения поперечных размеров этих судов оказываются стабильными ($\delta_v=3\%$): $H_b=0,63\pm0,02$ и $H_t=1,18\pm0,03$ и соответствуют зоне I графиков критических значений $h_{bkr}=f(B_n, H_t)$, представленных в работе ([9], см. рис.10). Это позволяет для малых НРС использовать при проектировании второй вид уравнения остойчивости с определением значения h_{bkr} в зависимости от отношения H_t в соответствии с полученной аппроксимацией $h_{bkr}=0,4-0,216H_t$. Вопрос о формировании этого уравнения для более крупных НРС

требует дополнительного осмысления и соответствующей доработки.

5. Вместимость современных РС и коэффициенты их утилизации

Вместимость основного корпуса МРС V_k , м³, может быть определена по формуле: $V_k = K_{sdl} C_v D(H_t)^{x-1}$, где K_{sdl} – коэффициент, учитывающий седловатость судна и погирь бимсов: $K_{sdl} = 1,015 \pm 0,01$, а C_v – эмпирический коэффициент, полученный по результатам статистической обработки данных: $C_v = 0,986 \pm 0,01$. Значение V_k может быть определено и по другой формуле: $V_k = L_p B H \delta_{vp}$, где δ_{vp} – коэффициент полноты основного корпуса: $\delta_{vp} = \delta + K_\delta (H-T)$, $K_\delta = 0,058 \pm 0,009$ при $\delta_v = 16\%$. Для НРС $V_k = C_{v1} D(H_t)^{x-1}$, где $C_{v1} = 1,049 \pm 0,03$ при $\delta_v = 3\%$.

Важной характеристикой вместимости современных РС является их брутто (GT) и нетто (NT) регистровые тоннажи, значения которых зачастую приводятся при представлении судна или его проекта. Статистический анализ этих характеристик показал их тесную корреляционную взаимосвязь с водоизмещением судна: $GT = 0,5022D - 110 \pm 52$ при $\delta_v = 3,8\%$ и $NT = 0,1478D + 1,7 \pm 4,9$ при $\delta_v = 1,1\%$. Их относительные значения определяются выражениями $GT/D = 0,4427 \pm 0,026$ ($\delta_v = 5,6\%$) и $NT/D = 0,1466 \pm 0,0037$ ($\delta_v = 2,5\%$), что позволяет их использовать при оценке водоизмещения РС.

Основная доля дедвейта НРС приходится на наливные танки с грузом рыбной продукции. Объем этих танков W_{tr} , м³, определяется регрессиями $W_{tr}/D = 0,31 - 0,4D/10^4 \pm 0,02$; $W_{tr} = 0,4878D - 99 \pm 53$ и $W_{tr} = 44,7L_p - 952$. Две последние регрессии более явно показывают, что с уменьшением размеров судна (при $L_p < 20$ м) возможность размещения на них наливных танков с их относительно тяжелым грузом становится проблематичной из-за перегруза, поскольку относительное водоизмещение порожнем $D_p/(L_p B H)$ малых стальных судов больше, чем для судов более крупных. Отметим также, что статистика, собранная по малым НРС, ограничивается длиной $L_p = 23$ м, а все рассмотренные МРС являются судами сухогрузного типа. Для последних характерна высокая погрузочная кубатура груза v_p , м³/т, значения которой превышают v_p судов наливного типа в 2-3 раза (для НРС $v_p = 1$). Следствием этого является либо необходимость ограничения современных чисто наливных судов по их длине, либо создание таких судов из легких материалов (см. [10]).

Теоретический объем основного корпуса РС V_k разделен на следующие составляющие:

- помещения общесудового назначения W_{osn} (это помещения боцманские, рыбопоискового комплекса с носовым подруливающим устройством, румпельного отделения),
- машинное отделение W_{mo} (за вычетом объемов для запасов топлива и пресной воды),
- производственные помещения судна W_{pp} (рыбообработывающий цех и различные агрегатные технологического назначения),

- грузовые помещения для хранения рыбной продукции W_{gr} ,
- помещения для экипажа W_{ekk} ,
- цистерны топливные W_{tp} , для пресной воды W_{pv} и жидкого балласта W_{bal} ,
- сетевые кладовые W_{sn} (они практически отсутствуют на МРС прибрежного рыболовства).

По своей осредненной относительной величине $w_i = W_i/V_k$ (естественно, с большим разбросом данных δ_v) на МРС наибольшие объемы занимают МО ($w_{mo} = 0,28 \pm 0,08$) и грузовые ($0,26 \pm 0,07$). При этом относительные объемы МО уменьшаются в соответствии с регрессиями $W_{mo}/V_k = 0,484 - 3V_k/10^4 \pm 0,09$ (при $\bar{y} = 0,283$ и $\delta_v = 31\%$) и $W_{mo}/N_{gd} = 0,391 - 2N_{gd}/10^4 \pm 0,08$ (при $\bar{y} = 0,242$ и $\delta_v = 33\%$). Далее следуют производственные помещения ($0,14 \pm 0,14$), помещения для экипажа ($0,12 \pm 0,07$), цистерны топливные ($0,10 \pm 0,07$), балластные ($0,05 \pm 0,03$) и для пресной воды ($0,02 \pm 0,01$). Замечено также, что на МРС доля объема балластных цистерн практически линейно убывает с ростом их вместимости. Это означает необходимость жидкого балласта (в первую очередь для обеспечения остойчивости) на малых судах и убывание его роли с ростом размеров РС, когда основным назначением этого балласта становится удифферентовка судна.

Для более крупных судов (НРС) приоритеты в распределении объемов существенно меняются. Наибольшими объемами обладают грузовые ($0,38 \pm 0,03$) и производственные помещения ($0,14 \pm 0,03$). Доля объемов МО в сравнении с МРС падает вдвое ($0,14 \pm 0,04$). Объем МО НРС на единицу мощности N_{gd} в среднем составляет $W_{mo}/N_{gd} = 0,159 \pm 0,19$ и определяется регрессией $W_{mo}/N_{gd} = 0,187 - N_{gd}/105$. Обратим особое внимание на то, что на отечественных судах этот показатель больше (более чем вдвое).

Доля объемов НРС по остальным составляющим (по мере убывания их значений) составляет: $w_{ekk} = 0,11 \pm 0,02$, $w_{tp} = 0,098 \pm 0,016$, $w_{osn} = 0,07 \pm 0,03$, $w_{sn} = 0,03 \pm 0,01$, $w_{pv} = 0,02 \pm 0,01$, $w_{bal} = 0,02 \pm 0,01$. Заметим также, что на НРС на одного члена экипажа отводится объем в 36 ± 13 м³ жилых и бытовых помещений, что также существенно превышает аналогичный отечественный показатель.

Закончим представление результатов статистической обработки данных по массам РС. Коэффициент утилизации водоизмещения среднетоннажных НРС по их дедвейту в среднем составляет $\eta_{Dw} = D_w/D = 0,47 \pm 0,04$ ($\delta_v = 9\%$). С ростом водоизмещения этих судов значения коэффициента увеличиваются в соответствии с регрессией $\eta_{Dw} = 0,432 + D/10^5$.

Доля дедвейта для МРС сухогрузного типа значительно ниже и составляет в среднем $\eta_{Dw} = 0,24 \pm 0,02$. Таким образом, на долю водоизмещения порожнем D_p этих судов приходится $\eta_{Dp} = 76\%$. Корректное уточнение данных по основным составляющим D_p (его корпусу и механизмам) оказалось затруднительным. В активе лишь полученные значения η_{Dp} и представленные ранее (см. гл.1 в [6]) данные о том, что на современных зарубежных судах D_p на 5-8% ниже, чем у

судов отечественных. Вместе с тем, для MPC удалось получить значение относительной ап-

пликаты их ЦТ $\zeta_{\text{гпор}}$, которая может быть оценена по формуле $\zeta_{\text{гпор}} = (1,051 - 0,077H) \pm 0,12$ ($\delta_v = 18\%$).

Заключение

Представлены результаты статистической обработки данных, полученных из различных источников и в ходе проектной реконструкции ряда современных MPC и НРС (в обработке данных активное участие принимали также студенты КГТУ К. Докучаев и А. Заянчковский). Полученные материалы в значительной мере исключили неопределенность в значениях характеристик и параметров проектирования рассмотренных судов. Вместе с тем представляется очевидным, что известное разнообразие РС по размерам, архитектуре, особенностям их назначения, а также по

технико-экономическим условиям их эксплуатации, весьма ограничивает использование статистического метода проектирования этих судов или т.н. проектирование «с чистого листа». Практически значимым по-прежнему представляется классический метод последовательных приближений с предваряющим выбором исходного судна-претендента из числа наиболее положительно зарекомендовавших себя судов, с использованием аппарата математического моделирования РС и их эксплуатации (см. [6]) и других современных информационных технологий.

Литература

1. Дудин С.Д. Технические характеристики зарубежных и российских рыболовных судов. № гос. регистрации базы данных 2017620511 от 15.5.2017г., Калининград, ФГБОУ ВО «КГТУ». 2017, 31 с.
2. Иванов В.П. Проектирование судов рыбопромыслового флота: уч.-метод. пособие к курсовому проектированию по тематике «Реконструкция параметров проектирования рыболовных судов наливного типа». Калининград, Изд-во ФГБОУ ВО КГТУ, 2016, 52с.
3. Иванов В.П., Дудин С.Д., Курдюков С.Г. О реконструировании параметров проектирования современных рыболовных судов наливного типа. СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3(33), С. 18-25.
4. Иванов В.П., Дудин С.Д., Курдюков С.Г. Математическое моделирование эксплуатации современного рыболовного судна при освоении его улова. СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3(33), С. 62-66.
5. Ашик В.В. Проектирование судов: учебник. Л.: Судостроение, 1985, 320 с.
6. Иванов В.П. Технико-экономические основы создания рыболовных судов: учебник. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010, 275 с.
7. Положение о классификации судов рыбопромыслового флота. Л.: Гипрорыбфлот, 1983, 24 с.
8. Раков А.И., Севастьянов Н.Б. Проектирование промысловых судов. Л.: Судостроение, 1981, 376 с.
9. Май К.Ч. Проектное обоснование характеристик и элементов маломерных рыболовных судов Вьетнама с позиций обеспечения мореходных качеств: автореферат канд. дис-ции. СПб, СПбГМТУ, 2010, 24 с.
10. Францев М.Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова. СПб: Судостроение, 2010, №5, с. 14-18.

References

1. Dudin S.D. Tehnicheskie harakteristiki zarubezhnyh i rossijskih rybolovnyh sudov. № gos. registracii bazy dann-nyh 2017620511 ot 15.5.2017g.: Kaliningrad, FGBOU VO «KGTU», 2017, 31 p.
2. Ivanov V.P. Proektirovanie sudov rybopromyslovogo flota: uch.-metod. posobie k kursovomu proektirovaniju po tematike «Rekonstrukcija parametrov proektirovanija rybolovnyh sudov nalivnogo tipa». Kaliningrad, Izd-vo FGBOU VO KGTU, 2016, 52 p.
3. Ivanov V.P., Dudin S.D., Kurdjukov S.G. (2016). O rekonstruirovanii parametrov proektirovanija sovremennyh rybolovnyh sudov nalivnogo tipa. SPb: Morskie intellektual'nye tehnologii, 3(33), 18-25.
4. Ivanov V.P., Dudin S.D., Kurdjukov S.G. (2016). Matematicheskoe modelirovanie jekspluatacii sovremennogo rybolovnogo sudna pri osvoenii ego ulova. SPb: Morskie intellektual'nye tehnologii, 3(33), 62-66.
5. Ashik V.V. Proektirovanie sudov: uchebnik. L.: Sudostroenie, 1985, 320 p.
6. Ivanov V.P. Tehniko-jekonomicheskie osnovy sozdanija rybolovnyh sudov: uchebnik. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2010, 275 p.
7. Polozhenie o klassifikacii sudov rybopromyslovogo flota. L.: Giprorybflot, 1983, 24 p.
8. Rakov A.I., Sevast'janov N.B. Proektirovanie promyslovyh sudov: uchebnik. L.: Sudostroenie, 1981, 376 p.
9. Maj K.Ch. Proektnoe obosnovanie harakteristik i jelementov malomernyh rybolovnyh sudov V'etnama s pozicij obespechenija morehodnyh kachestv: avtoreferat kand. dis-cii., SPb, SPbGMTU, 2010, 24 p.
10. Francev M.Je. (2010). Proektnye osobennosti zarubezhnyh promyslovyh sudov iz kompozicionnyh materialov dlja pribreznogo lova. SPb: Sudostroenie, 5, 14-18.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК: 621.74:681.3

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ СВАРНЫХ УЗЛОВ ИЗ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ СКЛОННОСТЬ К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Валерий Иванович Веревкин

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

Валерий Федорович Игушев

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии материалов и метрологии
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: lgushev_TMM@bga.gazinter.net

Светлана Александровна Терюшева

кандидат химических наук, доцент кафедры физики и химии
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: sterjushева@mail.ru

Аннотация

Склонность к электрохимической коррозии сварных узлов из судостроительных сталей оценивалась по величине электрического потенциала этих сталей. Сваренные или спаянные в одном месте стальные детали разного химического состава при наличии перепада температур между местом сварки (спая) и свободными концами образованной таким образом термопары могут создавать значительные термоэлектродвижущиеся силы. Установлено, что около 2/3 всей термоэлектродвижущейся силы при этом возникает из-за перепада в электродах термопары содержания кремния. Исследованы зависимости электрического потенциала низкоуглеродистых судостроительных сталей в функции содержания в них кремния, а также температуры и упруго-пластической деформации. Найдено, что наибольшее значение электрического потенциала исследованных сталей характерно при содержании кремния ниже 0,2 %. Температура окружающей среды оказывает значительное влияние на потенциал, что важно при значительном колебании температуры воды и воздуха. Склонность судостроительных сталей к коррозионному растрескиванию оказывается максимальной в области значительных пластических деформаций. Установлено, что нагрев одного края (периферии) сварного соединения плоских деталей понижает склонность сварного соединения к коррозионному растрескиванию.

Ключевые слова: судостроительная сталь, сварные соединения, кремний, температура, деформации, электропотенциал, электрохимическая коррозия, коррозионное растрескивание.

THE INFLUENCE OF SILICON CONTENT AND DEFORMATION OF WELDED ASSEMBLIES FROM SHIPBUILDING STEELS THEIR TENDENCY TO GALVANIC CORROSION

Valery Verevkin

doctor of technical sciences, professor, professor of chair of materials technology and Metrology
Baltic state Academy of fishing fleet
236029, Kaliningrad, street Youth, 6
e-mail: verevkinvi@mail.ru

Valery F. Igushev

candidate of technical Sciences, associate professor, head of department of materials technology and Metrology
Baltic state Academy of fishing fleet
236029, Kaliningrad, street Youth, 6
e-mail: lgushev_TMM@bga.gazinter.net

Svetlana Turusheva

candidate of chemical Sciences, associate professor of physics and chemistry

Baltic state Academy of fishing fleet
236029, Kaliningrad, street Youth, 6
e-mail: sterjusheva@mail.ru

Abstract

The propensity for galvanic corrosion of welded assemblies from shipbuilding steels was evaluated according to the magnitude of the electric potential of these steels. Welded or soldered in one place the pieces of steel of different chemical composition in the presence of a temperature differential between the weld (junction) and the free ends thus formed thermocouple can create significant thermoelectromotive force. It is estimated that around 2/3 of all thermoelectromotive power when this occurs because of the difference in the electrodes thermocouples silicon content. Investigated the dependence of the electric potential of low-carbon shipbuilding steels as a function of the content of silicon, temperature, and elastic-plastic deformation. Found that the greatest value of the electric potential of the investigated steels is characteristic when the silicon content less than 0.2 %. Ambient temperature has a significant influence on the potential, which is important when considerable fluctuation in the temperature of water and air. The tendency of shipbuilding steels to stress corrosion cracking is maximized in the region of large plastic deformations. It is established that the heating of one edge (periphery) of the welded connection of the flat parts reduces the tendency of welded joints to stress corrosion cracking.

Key words: shipbuilding steel, welded joints, silicon, temperature, deformation, electric potential, electrochemical corrosion, stress corrosion cracking.

Введение

подавляющее большинство сталей, в том числе и судостроительных, в качестве основной технологической примеси содержат кремний. Это объясняется, прежде всего, его использованием при выплавке сталей в качестве эффективного и дешевого раскислителя. Раскисляющий эффект дополнительно усиливается при комплексном раскислении совместно с марганцем и алюминием [1].

Как показали наши исследования, контакт разнородных сталей может вести себя как обычная термопара [2]. Сваренные или спаянные в одном месте стальные детали разного химического состава при наличии перепада температур между местом сварки (спая) и свободными концами образованной таким образом термопары могут создавать значительные термоэлектродвижущие силы (ТЭДС). Было установлено, что около 2/3 всей ТЭДС при этом возникает из-за перепада в электродах термопар содержания кремния. С большим отрывом далее следует углерод, алюминий и марганец.

Поскольку разброс содержания кремния в судостроительных сталях соединяемых металлоконструкций может отягчаться контактом с электропроводной морской водой, а температура внутри судна в среднем отличается от температуры воды на 20 °С, то склонность конструкции к самой разрушительной электрохимической коррозии [3] резко увеличивается. Требуется установить: по каким зависимостям меняются электрические потенциалы судостроительных сталей в функции содержания в них кремния, перепада температур и механических напряжений.

1. Влияние содержания кремния на склонность к электрохимической коррозии

Среди неметаллов кремний является наиболее электроположительным эле-

ментом. Соединения с неметаллами, в которых кремний выступает в качестве электроположительной составной части, для кремния наиболее характерны. Поведение кремния в сталях тесно коррелирует с содержанием в них углерода. Имеет место высокая растворимость кремния в α -железе при весьма малой его растворимости в модификации χ . Кремний полностью растворяется в феррите при содержании кремния до 0,30 %.

Показано, что влияние легирующего элемента на полиморфизм железа определяется не структурой этого элемента или его атомным диаметром, а тем электронным строением, которое элемент приобретает при взаимодействии с металлом-растворителем [4].

Несмотря на то, что роль структурно-геометрического фактора в образовании железо-кремнистых сплавов можно считать ведущей, свойства сплавов в значительной мере определяются изменениями типа межатомной связи, вносимыми присутствием кремния. Характерны в этом отношении данные работы [4], показывающие, насколько мало количество неметаллического элемента, необходимое для получения довольно заметных изменений в прочности межатомной связи и в свойствах сплава. Такой вывод сделан на основе изучения свойств ряда систем железо-неметалл (Si, Al, P и др.) в области малых концентраций неметалла. По заключению авторов наибольшие изменения электронной структуры твердого раствора являются результатом появления в кристаллической решетке 0,5-1,5% атомов неметалла, при этом атомы его ионизируются, образуя ковалентные связи металл-неметалл. Рост числа атомов железа для низкоуглеродистых кремнистых сталей обуславливается прежде всего снижением доли углерода и кремния в образующимся феррите.

Известно, что повышение растворимости кремния в феррите при высоких температурах

имеет важное практическое значение, поскольку коррозионная стойкость высококремнистого феррита повышается по мере увеличения содержания кремния. Справедливость данного предположения при различных температурах также проверялась в настоящей работе.

Исходным предположением исследования постулировалось значимое влияние на кинетику упорядочения факторов, повышающих общий

энергетический уровень кристаллической структуры – нагрева и пластической деформации. Экспериментально изучалось влияние кремния на склонность к электрохимической коррозии кремнийсодержащих судостроительных сталей, а также температуры и деформации. Склонность оценивалась по величине электрического потенциала сталей. В ходе экспериментов использовались образцы, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Образцы судостроительных сталей, использованных в эксперименте

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

Каждый образец исследуемой стали спаивался в рабочем спае со свинцовым электродом, обладающим нулевым потенциалом. Измеряя разность потенциалов образованной таким образом термопары с помощью микровольтнаноамперметра Ф-136, фактически измеряли потенциал самого образца. Результаты измерений приведены на рис. 1 и 2.

Как следует из полученных результатов, электропотенциал, а значит и склонность к электрохимической коррозии низкоуглеродистых кремнийсодержащих судостроительных сталей при комнатной температуре существенно зависит от содержания кремния в этих сталях только в области низких содержаний кремния в сплаве. При нагревании рабочего спая до 50, а затем и 100°C потенциал вначале меняет знак, а затем максимальное значение потенциала возрастает сначала в 10, а затем и в 15 раз по сравнению с исходными значениями! Предполагаемый максимум потенциала при нагревании рабочего спая термопары находится в районе 0,15 % Si, что однако требует дополнительной экспериментальной проверки.

Нелинейность в приэкстремальной области оказывается чрезвычайно большой: при увеличении содержания кремния от 0,20 всего до 0,24 % найденный по нескольким замерам потенциал снижается при температуре 50°C примерно в 5 раз! В то же время с возрастанием температуры до 100°C на том же диапазоне повышения кремния падение потенциала несколько замедляется

– снижается «только» в 2 раза. Содержание кремния в сплаве на уровне 0,30 % известно как предельное значение растворения кремния в феррите. При Si > 0,30 %, из пересыщенного раствора кремния в решетке феррита излишки кремния перемещаются к границам ядра, при этом в феррите образуются зерноподобные структуры с радиальной пограничной зоной повышенной концентрации положительно заряженного кремния. Как следует из рис. 2, при этом содержании кремния в сплаве наблюдается качественное изменение в характере поведения потенциальных кривых. В этом месте кривые испытывают резкий перегиб: падение потенциала сменяется его ростом.

В области 0,15 % Si имеет место максимум некомпенсированной ковалентной связи, ионизирующей атомы кремния и его производные, придающая им при повышенной температуре положительный потенциал. При Si ≥ 0,3 % в стали наблюдается плавное возрастание электроположительности стали предположительно из-за стабилизации мета-фазы. Затем в районе 0,9 % для нагретых образцов вновь начинается изменение тенденции поведения исследуемой зависимости.

Из рис. 2 следует, что в области температур от 22 до 100°C для большинства сталей наблюдается параболический рост зависимости электропотенциала от температуры рабочего спая образованной термопары.

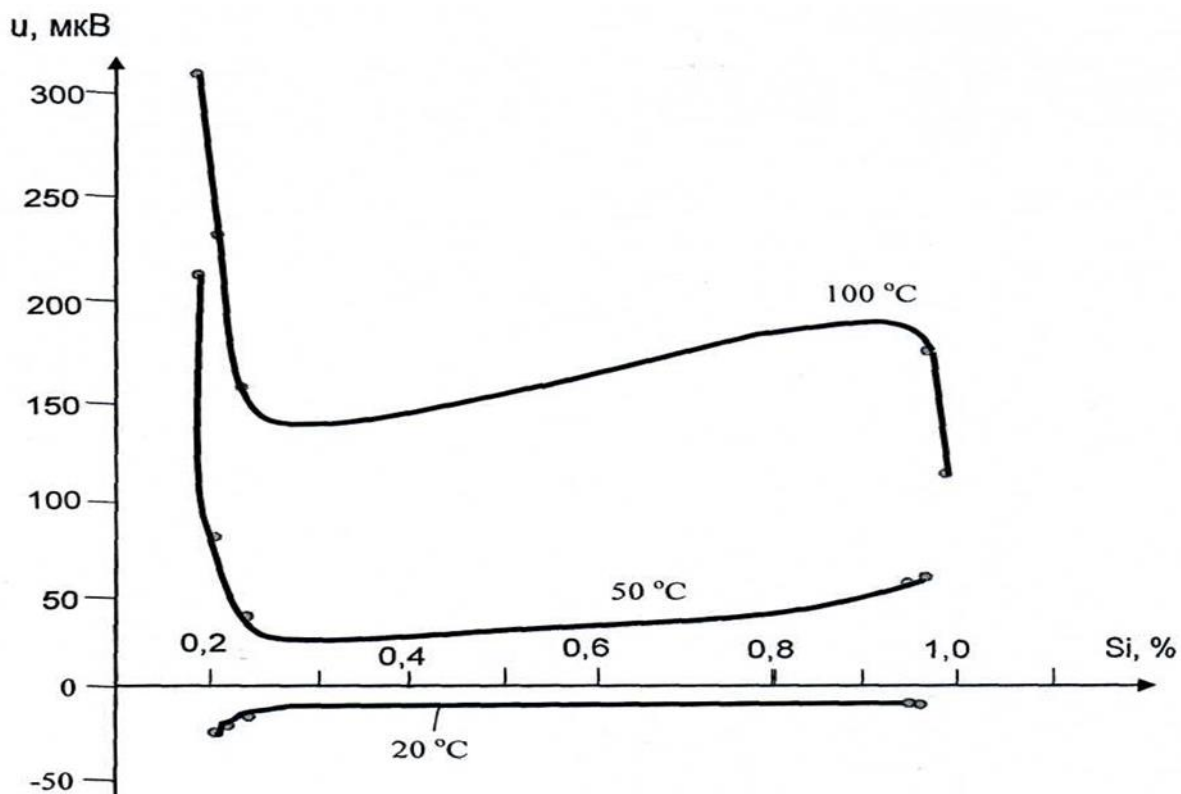


Рис.1. Зависимости потенциала кремнийсодержащей судостроительной стали от содержания кремния при разных температурах рабочего спая термопары

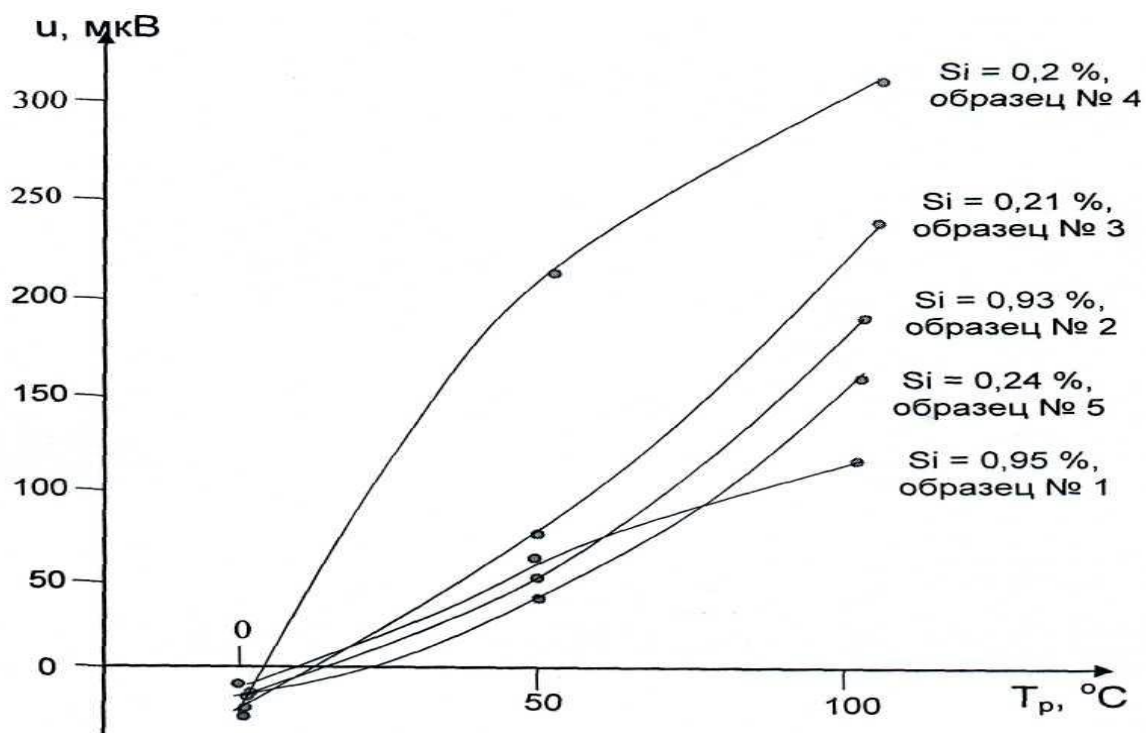


Рис. 2. Зависимости потенциала кремнийсодержащей судостроительной стали от температуры рабочего спая термопары при разном содержании кремния в сплаве

Исключение составляют образцы 1 и 4, в которых эти зависимости носят псевдоэкспоненциальный характер, что связано, по-видимому, с повышенным содержанием в них углерода: при большем углероде ионизация атомов кремния снижается из-за большей компенсированности ковалентной связи. Наблюдаемая на рис. 2 смена полярности при нагревании рабочего спая термопар может быть объяснена наличием на кремнистых сталях при комнатных температурах небольшого по величине, так называемого, приповерхностного запирающего слоя. При этом у поверхности детали из кремнийсодержащей стали наблюдаются окислительные процессы, обогащающие свободными электронами оксид и его приповерхностный слой, способствуя тем самым возникновению небольшого отрицательного потенциала по поверхности детали. Активные процессы, протекающие при нагреве образца легко демпфируют это влияние.

2 Влияние упруго-пластической деформации на склонность к электрохимической коррозии

Коррозионная стойкость судостроительных конструкций зависит не только от их химического состава и температуры, но и от возникающих механических напряжений [5]. В морских условиях многие сварные узлы подвергаются опасному коррозионному растрескиванию. Оно возникает при одновременном воздействии на металлоконструкцию растягивающих усилий и коррозионной среды.

При разработке технологии защиты сварных швов от электрохимического коррозионного растрескивания исследованы зависимости среднеинтегрального напряжения между вершинами и основаниями приповерхностных трещин гагаринского образца от относительного удлинения в процессе испытания образца на растяжение.

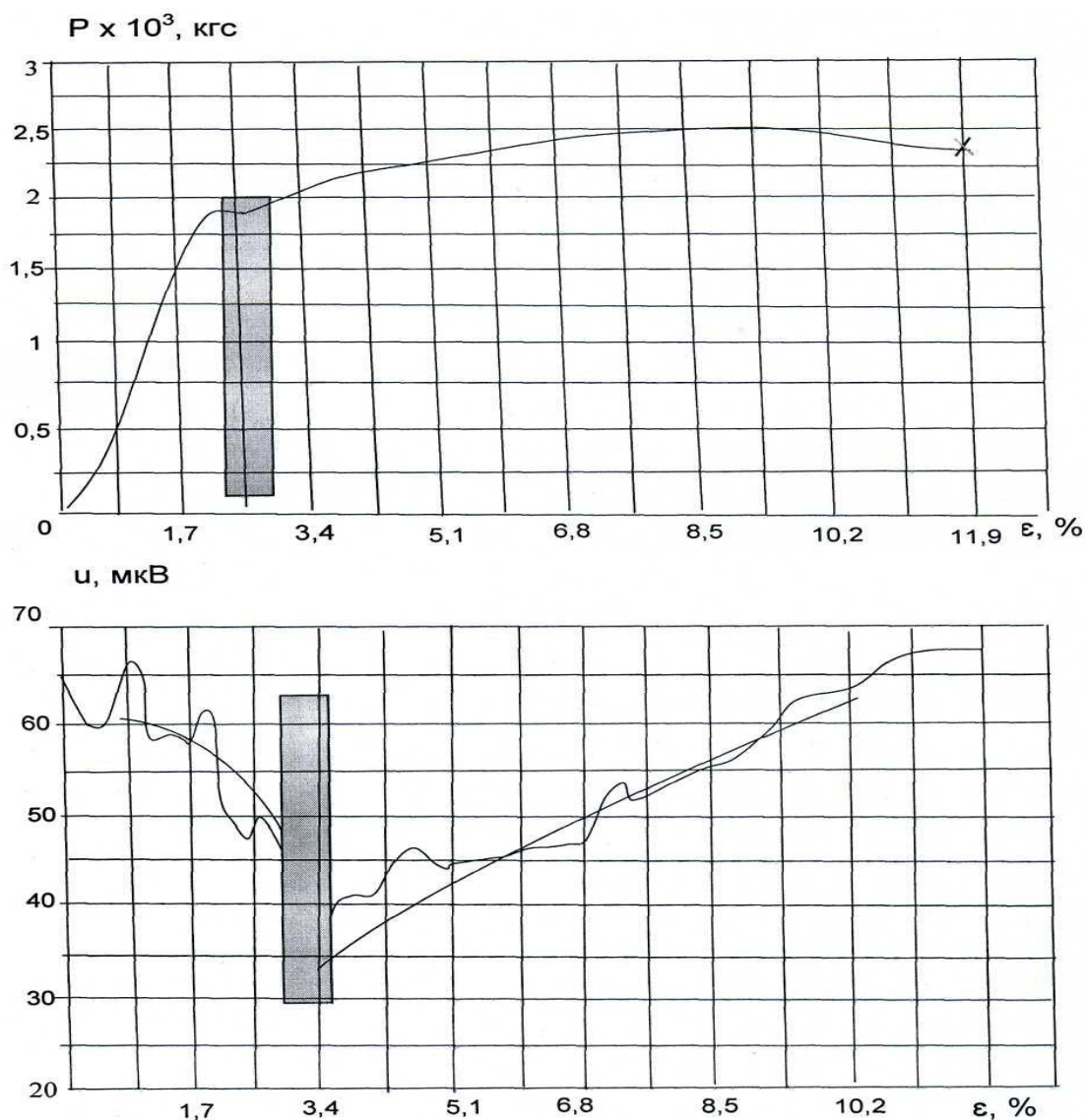


Рис. 3. Зависимость среднеинтегрального напряжения между вершинами и основаниями приповерхностных трещин гагаринского образца из стали D40S от относительного удлинения в процессе испытания образца на растяжение

Исследования проводили на разрывной машине Р-5. Растяжению подвергались гагаринские образцы, вдоль продольной оси которых сверлились отверстия диаметром 2 мм. В каждое такое отверстие зачеканивалась медная проволока. Интегральная разность потенциалов снималась между проволокой и карабином, сжимающим образец с наружной стороны по поперечной оси симметрии. Напряжение измерялось микровольтнаноамперметром Ф-136. Опыты многократно дублировались.

На рис.3 приведены результаты исследования, полученные для образца 1 таблицы 1.

Установлено, что нагрев одного края (периферии) сварного соединения плоских деталей понижает склонность сварного соединения к коррозионному растрескиванию. Этот факт можно объяснить повышением пластичности прогретой части сваренного образца, сдерживающим процесс хрупкого разрушения в зоне сварки.

Следует отдельно отметить, что актуальность данного направления исследования, в частности,

определяется тем обстоятельством, что правка грибовидности стыковых и тавровых соединений при монтаже судостроительных конструкций оказывается крайне затруднительной.

Заключение

В работе было определено, что коррозионная стойкость судостроительных конструкций зависит содержания в них кремния, а также температуры и упруго-пластической деформации. Найдено, что наибольшее значение электрического потенциала исследованных сталей имеет место при различном содержании кремния в сварных соединениях, особенно при низких содержаниях кремния ниже 0,2 %. Температура окружающей среды оказывает значительное влияние на потенциал, что важно при значительном колебании температуры воды и воздуха. Склонность судостроительных сталей к коррозионному растрескиванию оказывается максимальной в области значительных пластических деформаций.

Литература

1. 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.
2. Вережкин В.И. Новая концепция снижения электрохимической коррозии обшивок судов (статья) / В.И. Вережкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. IV Международный балтийский морской форум. IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов Часть 1. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 70-73.
3. Андреев Н. Т. Ремонт судов / Н. Т. Андреев, О. А. Борчевский, В. Г. Луговых и др. – Л.: Судостроение, 1972. – 568 с. .
4. Все о металлургии. Система «Железо-кремний» <http://www.metal-archive.ru>824-sistema-zhelezo-kremniy>.
5. Шлугер М.А. Коррозия и защита металлов. /М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.

References

1. Tekhnicheskiye osnovy staleplavil'nykh protsessov [Tekst]. Uchebnoye posobiye dlya vuzov. R.S. Ayzatulov, P.S. Kharlashin, Ye.V. Protopopov, L.YU. Nazyuta. M.: MISIS, 2002. 320 p.
2. Verevkin V.I. (2016). Novaya kontseptsiya snizheniya elektrokhimicheskoy korrozii obshivok sudov (stat'ya). V.I. Verevkin, V.F. Igushev, S.A. Teryusheva. IV Mezhdunarodnyy baltiyskiy morskoy forum. IV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoy industrii»: tezisy dokladov Chast' 1. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 70-73.
3. Remont sudov Monografiva N.T. Andreev, O.A. Borchevskiy, V.G. Lugovykh I dr. L.: Sudostroyenive, 1972. 568 p.
4. Vse o metallurgii. Sistema «Zhelezo-kremniy» <http://www.metal-archive.ru 824-sistema-zhelezo-kremniy>.
5. Shluger M.A. Korroziya i zashchita metallov. M.A. Shluger, F.F. Azhogin, Ye.A. Yefimov. M.: Metallurgiya, 1981. 216 p.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

УДК 537.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СУДОВЫХ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЯМР РЕЛАКСОМЕТРИИ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

Николай Яковлевич Синявский

доктор физико-математических наук, профессор
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Иван Георгиевич Мершиев

ассистент института физико-математических наук и информационных технологий
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта
236016, г. Калининград, ул. А.Невского, 14
e-mail: IMershiev@kantiana.ru

Аннотация

Целью настоящей работы явилось исследование возможностей идентификации, контроля качества, обнаружения суррогатов судовых горюче-смазочных материалов с помощью релаксометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с инверсией преобразования Лапласа. Результаты подобных исследований нефтепродуктов с помощью распределений времен продольной (T_1) и поперечной (T_2) релаксации в литературе отсутствуют и являются новыми.

В качестве методов исследования использовались релаксометрия ЯМР протонов в слабом магнитном поле, импульсные последовательности насыщения и инверсии-восстановления для измерения распределений T_1 , и Карра-Парцелла-Мейбума-Джилла (CPMG) для измерения распределений T_2 . Для 1D – инверсии использован алгоритм регуляризованной инверсии преобразования Лапласа (RILT).

Показано, что распределения времен продольной и поперечной релаксации достаточно специфичны для каждого нефтепродукта. Положения пиков на распределениях, модальность распределений зависят от соотношения парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов в топливах и маслах.

Надежность полученных данных подтверждается широким использованием вышеуказанных ЯМР – методик в мировой практике, в том числе в релаксометрии ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР). Рекомендовано создание компактного, переносного прибора для неразрушающего контроля качества судовых горюче-смазочных материалов на основе полученных в работе результатов.

Ключевые слова: судовые горюче-смазочные материалы, контроль качества, ЯМР релаксометрия

INVESTIGATION OF SHIP FUEL-LUBRICANTS BY MEANS OF NMR RELAXOMETRY METHOD FOR QUALITY CONTROL

Nikolay Sinyavsky

the Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Department of Physics and Chemistry of the Baltic State Fishing Fleet Academy
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: n_sinyavsky@mail.ru

Ivan Mershiev

the Assistant of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies
Immanuel Kant Baltic Federal University
236016, Kaliningrad, ul. A.Nevskogo, 14
e-mail: IMershiev@kantiana.ru

Abstract

The purpose of this work was to investigate the possibilities of identification, quality control, detection of surrogates of marine fuels and lubricants using the nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry with Laplace transform inversion. The results of similar studies of petroleum products using the distributions of longitudinal (T_1) and transverse (T_2) relaxation times are not available in the literature and are new.

Relaxometry of the proton NMR in a weak magnetic field, the impulse sequences of saturation and of the inversion-recovery for measuring T_1 distributions, and Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) sequence for measuring T_2 distributions were used as research methods. For 1D-inversion, the algorithm of regularized inverse Laplace transform (RILT) is used.

It is shown that the distributions of the longitudinal and transverse relaxation times are quite specific for each oil product. The positions of the peaks in the distributions, the modality of the distributions depend on the ratio of paraffinic, naphthenic and aromatic hydrocarbons in fuels and oils.

The reliability of the data obtained is confirmed by the extensive use of the above NMR techniques in the world practice, including the relaxometry of nuclear quadrupole resonance (NQR). It is recommended to create a compact, portable device for non-destructive quality control of marine fuel and lubricants based on the results obtained in the work.

Key words: marine fuels and lubricants, quality control, NMR relaxometry

Введение

Проблема контроля качества нефтепродуктов представляет собой важную задачу, так как от этого зависит сохранность эксплуатируемой техники и безопасность на транспорте. Существующие в настоящее время методы контроля или не обеспечивают однозначной идентификации качества нефтепродуктов, или являются сложными и дорогостоящими. Кроме того, стандартные методы анализа качества нефтепродуктов, как правило, требуют значительных затрат времени. Разработка новых экспресс-методов контроля качества и обнаружения подделок с помощью компактных приборов представляет собой актуальную задачу.

Эффективность использования топлив и смазочных материалов на судах зависит от надежности контроля их качества. От качества зависит и рациональность использования этих материалов и охрана окружающей среды. В качестве нового экспресс-метода неразрушающего контроля качества может быть исследован метод релаксометрии ЯМР протонов с инверсией преобразования Лапласа.

Термин «релаксометрия» относится к классу ЯМР-экспериментов, где основной упор делается на измерении времен релаксации ядерных спинов с целью характеристики физических и динамических свойств образца. Основным методологическим отличием ЯМР-релаксометрии с слабом полем является то, что данные в ней анализируются во временной, а не в частотной области. Времена релаксации получают путем анализа экспоненциального распада или восстановления сигнала ЯМР. Времена релаксации чувствительны к вращательной и поступательной диффузии, а также к процессам химического обмена. Таким образом, многокомпонентные или многофазные выборки экспериментальных данных могут содержать разрешимые домены с явно отличающимися значениями T_2 или T_1 .

В работе [1] обсуждаются различные типы компактных ЯМР-релаксметров, типичные им-

пульсные последовательностями и приложения для исследования жидкостей, полимеров, биологических тканей, пористых материалов и пр.

Времена продольной релаксации T_1 и поперечной релаксации T_2 позволяют судить расстояниях между атомами водорода и о характере движений молекул в образце. Знание T_2 и скорости спин-решеточной релаксации позволяют их соотнести к различным типам подвижности молекулярных фрагментов.

В настоящее время все шире используется разработка различных методов ЯМР в сильных неоднородных постоянном и радиочастотном магнитных полях. Такие ЯМР-приложения предлагаются, в том числе, для испытаний различных материалов [2].

ЯМР релаксометрия дает информацию о диффузии и молекулярной динамике веществ, и при этом требует минимальной однородности поля, в отличие от традиционных методов спектроскопии ЯМР высокого разрешения. Тем самым релаксометрия обеспечивает широкий диапазон применений и использование небольших и портативных устройств. В последние годы в связи с разработкой устойчивых алгоритмов численного инверсии преобразования Лапласа получила новый импульс релаксометрия ЯМР, позволяющая получать распределения времен релаксации, несущих информацию о структуре и динамике макромолекул [3].

Методы ЯМР и ЯКР релаксометрии нами ранее были успешно применены [3,4] для анализа деструкции полимеров и исследования микропористых и микрокомпозитных материалов.

Целью данной работы явилось исследование возможности применения метода ЯМР релаксометрии с инверсией преобразования Лапласа для контроля качества судовых горюче-смазочных материалов.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Все ЯМР - эксперименты выполнены на протонах на частоте 13.65 МГц в слабом магнитном поле с помощью спектрометра Testmag Apollo с программным обеспечением TNMR (рис. 1). Постоянный магнит, который использовался, позволял иметь следующие размеры для образца: диаметр – 5 мм, длина – 20 мм. Для измерения времен продольной релаксации T_1 нами применялась импульсная последовательность $90^\circ - \tau - 90^\circ$ (метод насыщения) и последовательность $180^\circ - \tau - 90^\circ$ (метод инверсии-восстановления). Для измерения времен поперечной релаксации T_2 была использована последовательность CPMG.

Обращение преобразования Лапласа выполнялось с помощью программы RILT, представленной в работе [5]. Массив данных распределения времен релаксации $p(T)$ представляет собой обратное преобразование Лапласа от функции (1), которая представляет собой измеряемый массив $S(t)$, и рассчитывается с использованием регуляризации с помощью метода наименьших квадратов.

$$S(t) = \int_0^\infty p(T) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) dT + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ – вклад шума.

В процессе расчетов использовалось от 50 до 200 итераций.

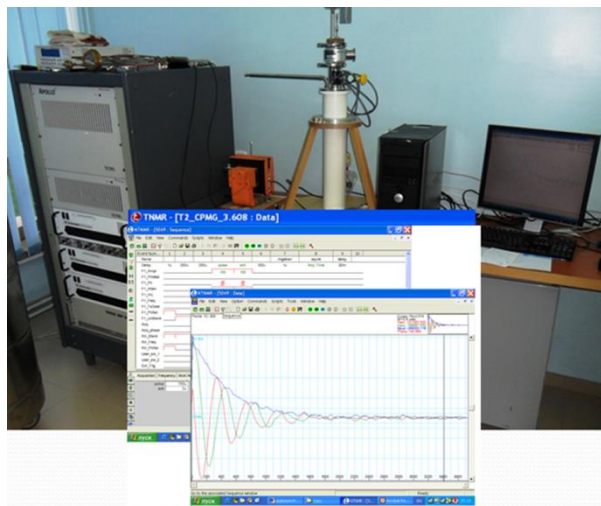


Рис 1. Спектрометр Тестмаг - Аполло и интерфейс программного обеспечения TNMR.

Для исследований были использованы следующие нефтепродукты: дизельное топливо (ДТ), судовое маловязкое топливо (СМТ), смесь ДТ и СМТ, мазут М-100, базовые масла SN-150 и SN-500. Судовое маловязкое топливо используется в средне- и высокооборотных судовых дизельных двигателях. В отличие от дизельного топлива оно имеет более низкое цетановое число и более высокое содержание серы. Мазут М-100 предназначен для малооборотных судовых двигателей. Он имеет невысокое содержание серы и золы,

однако, из-за высокой вязкости, застывает при достаточно высокой температуре. Масла SN-150 и SN-500, применяемые в качестве основы при производстве моторных масел, отличаются кинематической вязкостью, содержанием серы и коксуемостью.

2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Результаты исследования распределения времен релаксации T_1 и T_2 в топливах иллюстрируют рисунки 2 и 3.

Судовые горюче-смазочные материалы, как продукты переработки нефти, состоят из очень большого числа разных веществ. В основном, это жидкие углеводороды, в меньшей степени смолы, асфальтены, карбены и гетероатомные органические соединения. Такие многокомпонентные системы парафиновых (например, гексадекан (цетан) $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3$), нафтеновых ряда C_nH_{2n} (например, циклодекан $\text{C}_{10}\text{H}_{20}$) и ароматических углеводородов (например, альфа-метилнафталин $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_3$) имеют различную структуру, молекулярный вес и подвижность молекулярных фрагментов и молекул в целом.

Парафиновые углеводороды имеют линейное или разветвленное строение, содержат только простые связи и до сорока атомов углерода в цепи. Нафтены это моно-, и полициклические соединения, в которых атомы углерода соединены простой одинарной связью в циклические структуры. Ароматические углеводороды - циклические соединения с ароматической группой.

Все это определяет разные значения времен продольной (T_1) и поперечной (T_2) релаксации для ядер водорода, находящихся в разных углеводородах и фрагментах их молекул.

Дизельные топлива – это сложные смеси алканов, циклоалканов, ароматических углеводородов и их производных. Одномодальность распределения времен продольной релаксации топлива ДТ и СМТ (рис. 2а,б) обусловлена тем, что релаксация осуществляется за счет движений молекул преобладающих в топливе типов углеводородов и тем, что эти движения мало отличаются друг от друга. Времена T_1 для обоих топлив близки друг к другу. Для смеси (1:1) топлив ДТ и СМТ (рис.2с) происходит перераспределение релаксационных вкладов в сигнал ЯМР от разных молекулярных групп углеводородов и распределение T_1 становится мультимодальным.

Времена поперечной релаксации для мазута М-100 на порядок меньше, чем у ДТ и СМТ, что вызвано малой подвижностью молекул углеводородов из-за высокой вязкости продукта. Кинематическая вязкость ДТ 2.285 $\text{мм}^2/\text{с}$ (при 40°C), у ТМС 3.901 $\text{мм}^2/\text{с}$ (при 20°C) и у мазута М-100 - 118 $\text{мм}^2/\text{с}$ (при 80°C).

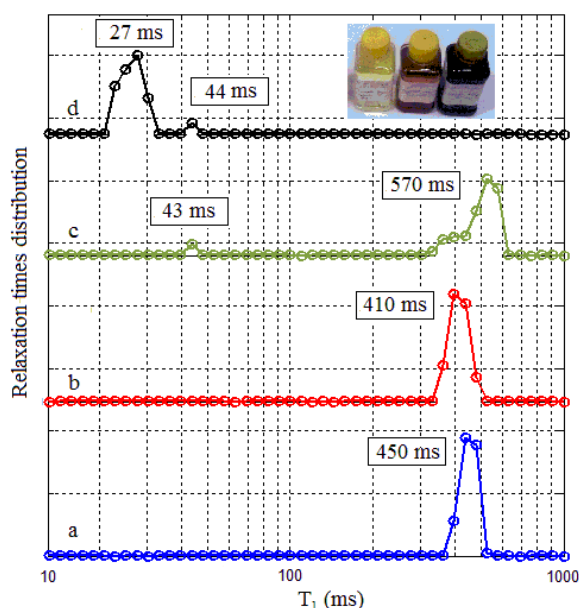


Рис. 2. Распределение времен релаксации T_1 : ДТ (а), СМТ (б), смесь 1:1 ДТ и СМТ (с), мазут М-100 (д).

Бимодальность распределения T_1 для мазута М-100 обусловлена наличием в нем углеводородов с существенно различной молекулярной массой и подвижностью молекул. В короткую компоненту T_1 вносят вклад тяжелые молекулы, а в длинную – легкие.

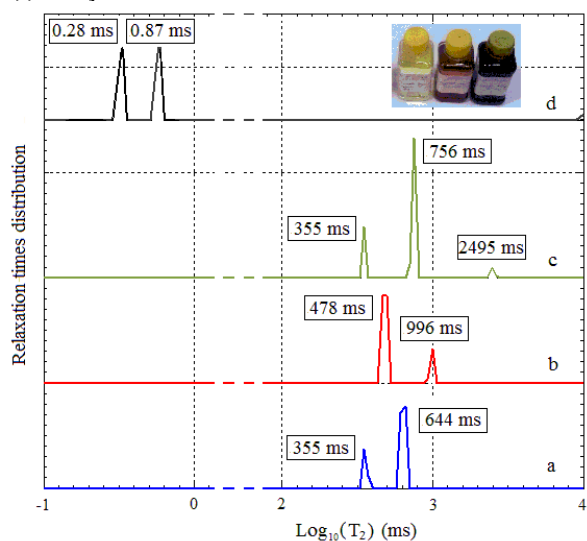


Рис. 3. Распределение времен релаксации T_2 : ДТ (а), СМТ (б), смесь 1:1 ДТ и СМТ (с), мазут М-100 (д).

В отличие от распределения времен T_1 , распределение времен поперечной релаксации T_2 для топлив ДТ и СМТ бимодальны (рис. 3а,б). Бимодальным распределение времен T_2 является и для мазута М-100, однако для него времена релаксации на порядок меньше. Специфичным и мультимодальным распределение времен T_2 является для смеси (1:1) ДТ и СМТ. Мультимодальность распределений T_2 свидетельствует об отличии амплитуд колебаний молекул с разной структурой и молекулярной массой.

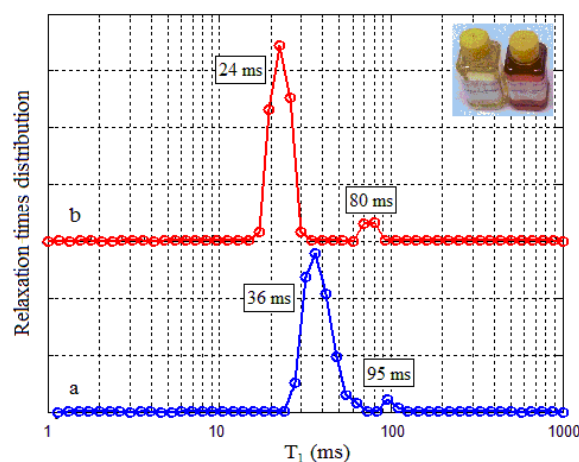


Рис. 4. Распределение времен релаксации T_1 ЯМР 1H для масел SN-150 (а) и SN-500 (б).

Распределение времен релаксации T_1 для масел SN-150 и SN-500 показаны на рис. 4. Эти распределения – бимодальны, с существенным преобладанием коротковременной составляющей. В обоих маслах парафиновых углеводородов вдвое больше, чем нафтенных, а ароматические углеводороды практически отсутствуют. Кинематическая вязкость масла SN-150 примерно вдвое больше, чем у масла SN-500. По величинам времена релаксации T_1 и T_2 исследованных масел близки к соответствующим значениям для мазута М-100. В составе преобладающих времен релаксации T_2 для масла SN-500 (рис. 5) три значения, в отличие от масла SN-150.

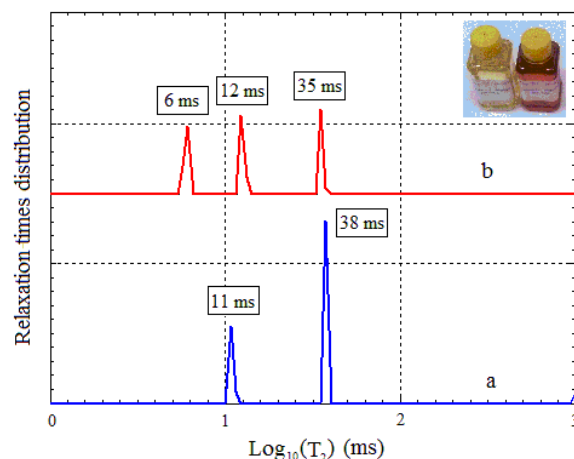


Рис. 5. Распределение времен релаксации T_2 ЯМР 1H для масла SN-150 (а) и SN-500 (б).

Результаты экспериментов показывают, что распределение времен релаксации исследованных образцов существенным образом отличается друг от друга и могут быть использованы для характеристики нефтепродуктов. Значения времен релаксации у разных образцов, по всей вероятности, определяется соотношением парафиновых, нафтенных и ароматических углеводородов. Эти углеводороды составляют основную часть состава нефтепродуктов, именно их прото-

ны дают основной вклад в сигнал ЯМР. Парафиновые, нефтяные и ароматические углеводороды имеют различную структуру и динамику движения молекулярных фрагментов, что и определяет величины времен релаксации и модальность из распределений.

Заключение

Таким образом, в работе выполнены экспериментальные исследования методом релаксометрии ЯМР ^1H ряда горюче-смазочных материалов. С использованием инверсии преобразования Лапласа получены распределения времен продольной и поперечной релаксации протонов. Установлено, что все полученные распределения времен T_1 и T_2 отличаются для разных материалов. На основании анализа распределений времен релаксации сделано предположение, что модальность распределений и величины времен релаксации определяются соотношением парафиновых, нефтяных и ароматических углеводородов в образцах.

Используемая в работе методика релаксометрии позволяет устанавливать взаимосвязь между количественным соотношением углеводородов разных типов в нефтепродукте и распределением времен релаксации ЯМР протонов. Время релаксации T_2 позволяет обнаружить изменение качества топлива и масла, вызванное добавлением других, более дешевых продуктов и примесей. Чем выше вязкость продукта, тем меньше значение времени поперечной релаксации T_2 . По характеру распределения времен релаксации может быть реализована диагностика качества горюче-смазочных материалов. Метод релаксометрии с инверсией преобразования Лапласа может использоваться для идентификации, определения качества и обнаружения суррогатов судовых горюче-смазочных материалов.

Благодарности. Авторы благодарят Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР AAA-A17-117041810027-8).

Литература

1. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.
2. Balibanu F., Hailu K., Eymael K., Demco D.E., & Bluemich B. (2000). Nuclear magnetic resonance in inhomogeneous magnetic fields. *Journal of Magnetic Resonance*, 145, 246–258.
3. 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.
4. Sinyavsky N., Dolinenkov, P. & Kupriyanova G. (2014). The T_1 and T_2 Relaxation Times Distribution for the ^{35}Cl and ^{14}N NQR in Micro-composites and in Porous Materials. *Applied Magnetic Resonance*, 45, 471–482.
5. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Электронный ресурс].

References

1. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.
2. Balibanu F., Hailu K., Eymael K., Demco D.E., & Bluemich B. (2000). Nuclear magnetic resonance in inhomogeneous magnetic fields. *Journal of Magnetic Resonance*, 145, 246–258.
3. 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.
4. Sinyavsky N., Dolinenkov, P. & Kupriyanova G. (2014). The T_1 and T_2 Relaxation Times Distribution for the ^{35}Cl and ^{14}N NQR in Micro-composites and in Porous Materials. *Applied Magnetic Resonance*, 45, 471–482.
5. Marino I.-G. (2004). <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].

УДК 629.5

БИО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СУДОВЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Валерий Феодосиевич Белей

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

Максим Сергеевич Харитонов

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

Аннотация

В настоящее время прослеживается тенденция к внедрению светодиодных источников света в системах освещения судов. Современные светодиодные лампы и световые приборы являются для судовой электроэнергетической системы нелинейной электрической нагрузкой, а их работа сопряжена с эмиссией электромагнитных помех. В то же время характеристики их оптического излучения, а, следовательно, и его воздействие на экипаж судна (био-совместимость), в определенной степени зависят от параметров электрической энергии в судовой электроэнергетической системе. Разнообразие характеристик светодиодной продукции и недостаточная проработка вопросов биоэлектромагнитной совместимости светодиодных источников света обуславливает актуальность данного исследования.

В работе выявлены основные проблемы обеспечения биоэлектромагнитной совместимости светодиодных систем освещения. Дан анализ требований к электромагнитной совместимости в судовых системах. С использованием методов экспериментального исследования и математического моделирования рассмотрены вопросы функционирования систем освещения судов в условиях наличия искажающих нагрузок. Дана оценка воздействия светодиодных источников света на питающую сеть и экипаж судна.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, судовое освещение, светодиод, искажающая нагрузка, помехоустойчивость, качество электроэнергии, несинусоидальность, фликер,

BIO AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SHIPBOARD LIGHTING SYSTEMS BASED ON LED LIGHT SOURCES

Valeriy Beley

Dr.Sc.(Eng), professor, head of the Department of electrical equipment of ships and electrical power engineering
Kaliningrad State Technical University
Sovietskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation
e-mail: vbeley@klgtu.ru

Maxim Kharitonov

senior lecturer
Kaliningrad State Technical University
Sovietskiy prospekt, 1, Kaliningrad 236022, Russian Federation

Abstract

Nowadays, LED light sources are introduced in shipboard lighting systems. Modern LED lamps and fixtures are non-linear electric loads for the shipboard electric power system, and their operation is associated with the emission of electromagnetic interference. At the same time, the characteristics of their optical radiation, and, consequently, its impact on the ship's crew (bio-compatibility), depend on the parameters of electrical energy in the shipboard electric power system. A variety of characteristics of available LED products and insufficient development of the issues of bioelectromagnetic compatibility of LED light sources determine the relevance of this study.

Main problems of ensuring the bioelectromagnetic compatibility of LED lighting systems are revealed in the paper. The analysis of requirements to electromagnetic compatibility in ship systems is given. The results experimental research and mathematical modeling are given to consider problems of

the operation of ship lighting systems in the presence of distorting loads. The impact of LED light sources on the supply network and the ship's crew is assessed.

Key words: Electromagnetic compatibility, ship lighting, LED, distorting load, noise immunity, power quality, non-sinusoidal, flicker.

Введение

Современный этап развития судостроения и судоремонта характеризуется внедрением на судах передовых технологий, в том числе и в области судовых систем освещения. Увеличение доли электрооборудования на основе силовой преобразовательной и микропроцессорной техники, с одной стороны, обеспечивает возможность построения интеллектуальных систем контроля и управления технологическим процессом, а, с другой стороны, способно приводить к росту эмиссии электромагнитных помех и ухудшению электромагнитной обстановки на судне, что делает актуальным вопрос обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) данного оборудования с судовой электрической сетью.

Современные светодиодные лампы и световые приборы являются для судовой электроэнергетической системы (ЭЭС) нелинейной электрической нагрузкой, а их работа сопряжена с эмиссией электромагнитных помех. В то же время характеристики их оптического излучения, а, следовательно, и его воздействие на экипаж судна (био-совместимость), в определенной степени зависят от параметров электрической энергии в судовой ЭЭС.

В работе дан анализ требований к ЭМС в судовых ЭЭС. Рассмотрены вопросы функционирования систем освещения судов в условиях наличия искажающих нагрузок. Дана оценка воздействия светодиодных источников света на питающую сеть и экипаж судна.

1. Анализ проблем биоэлектромагнитной совместимости систем освещения

Светодиодные (СД) источники света (лампы и световые приборы) превосходят лампы накаливания и люминесцентные лампы по энергетическим и эксплуатационным характеристикам: светоотдаче, надежности, сроку службы и экологичности (табл. 1) [1]. В отличие от люминесцентных ламп СД аналоги не содержат опасных паров ртути. В связи с этим происходит их повсеместное внедрение, в том числе, в системах освещения судов.

Морские суда в зависимости от их назначения могут иметь высокий уровень энерговооруженности и оснащены различными видами электрооборудования. В особенности это характерно для промысловых судов, где по элементам судовой ЭЭС протекают мощные потоки энергии, создавая электромагнитные поля с частотами от 0 до 40 кГц и более, которые напрямую или через акустические волны оказывают воздействие на организм человека. Следует отметить, что биоритмы человеческого организма имеют различ-

ные частоты и уязвимы для внешних резонансных воздействий (альфа-ритм головного мозга 8-13 Гц, собственная частота нервной системы 5-400 Гц, максимальная чувствительность уха 2-5 кГц) [2].

Таблица 1
Характеристики различных типов ламп

Тип лампы	Достигнутая светоотдача, лм/Вт	Теоретическая светоотдача, лм/Вт	Срок службы, тыс. ч.
Накаливания	20	53,5	до 4
Люминесцентная	108	240	до 15
Светодиодная	102	более 300	до 100

Системы освещения судов функционируют во взаимосвязи с электроэнергетическими и биологическими (экипаж) системами судна. СД источники света, являясь нелинейной нагрузкой, оказывают воздействие на судовую электрическую сеть (кондуктивные помехи) и на экипаж судна (оптическое излучение). Взаимосвязь данных факторов определяет уровень биоэлектромагнитной совместимости систем освещения – их способности при нормальной работе не оказывать недопустимых электромагнитных воздействий на питающую сеть и обеспечивать безопасное для человека оптическое излучение при наличии искажений питающего напряжения в электрической сети.

2. Анализ нормативных требований

Вопросы обеспечения ЭМС в системах освещения связаны с величиной кондуктивных электромагнитных помех и параметрами физических полей судна, в том числе в видимом диапазоне (оптическое излучение световых приборов). Нормы эмиссии кондуктивных электромагнитных помех относятся к вопросам качества электрической энергии (КЭ). Современные тенденции в области нормирования КЭ можно выявить на основе анализа стандартов [3-5] (табл. 2). В соответствии с результатами анализа нормируемых показателей КЭ определяющими для ЭМС систем освещения являются: несинусоидальность, отклонение и колебания напряжения.

Несинусоидальность напряжения определяется двумя показателями:

- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 (1);

- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U , % в точке передачи электрической энергии (2).

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

$$K_{U(n)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (2)$$

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

Для ограничения эмиссии кондуктивных электромагнитных помех со стороны осветительного оборудования ГОСТ 30804.3.2-2013 [6] устанавливает нормы эмиссии высших гармоник (ВГ) тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (табл. 3).

Таблица 2

Сравнительный анализ требований стандартов

Показатель	Правила КПМС РМРС	ГОСТ 32144-2013	EN 50160:2010
Отклонение напряжения	Длительное: +6 / -10 % Кратковременное: ±20 % (1,5 с)	Положительное не более 10 % Отрицательное не более 10 %	В синхронных системах: ±10 % В изолированных системах: +10/-15 %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих	не более 10 %	не более 8 % ($U_{ном} = 0,38$ кВ) не более 5 % ($U_{ном} = 6-25$ кВ)	не более 8 % ($U_{ном} = 0,38-35$ кВ)
Колебания напряжения	не нормируется	Доза фликера кратковременная (Pst) не более 1,38 длительная (Plt) не более 1	Доза фликера длительная (Plt) не более 1 (95 % времени)

Таблица 3

Нормы эмиссии высших гармоник тока

Стандарт	Порядок гармонической составляющей тока						
	3	5	7	9	11	13	15
Световые приборы с потребляемой активной мощностью менее 25 Вт							
Допустимая эмиссия высших гармоник тока, мА/Вт							
ГОСТ 30804.3.2-2013	3,4	1,9	1,0	0,5	0,35	0,296	0,257
Световые приборы с потребляемой активной мощностью более 25 Вт							
Коэффициенты гармонических составляющих тока, %							
ГОСТ 30804.3.2-2013	-	10	7	5	3	3	3

Колебания напряжения в электрической сети обуславливают возникновение фликера – явления субъективного восприятия колебаний светового потока источника света. Фликер является характеристикой биоэлектромагнитной совместимости световых приборов, их влияния на организм человека. Пульсации светового потока приводят к утомлению, снижению производительности труда и отражаются на здоровье человека. Установлено, что наиболее раздражающее действие фликера на организм человека проявляется при частоте колебаний 8,76 Гц, соответствующей собственной частоте колебаний клеток головного мозга [7].

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 показателями КЭ, относящимися к колебаниям напряжения, являются кратковременная доза фликера Pst (3), измеренная в интервале времени 10 мин, и длительная доза

фликера Plt, измеренная в интервале времени 2 часа, в точке передачи электрической энергии.

$$P_{st} = \sqrt[3.2]{\left(\sum (2,3 \cdot (F \cdot d_{max})^{3.2}) \right) / T_p} \quad (3)$$

где F – коэффициент приведения, определяемый в зависимости от вида кривой изменения напряжения; d_{max} – максимальное относительное изменение напряжения в процентах от номинального значения; T_p – период наблюдения.

Показатель дозы фликера, кроме того устанавливает непосредственные взаимосвязи между кондуктивными электромагнитными помехами в судовой сети и соответствующими им изменениями электромагнитных полей судна в видимом диапазоне (оптического излучения световых приборов).

Постоянство во времени электромагнитных полей видимого диапазона и обеспечение определенной интенсивности светового излучения также нормируется требованиями к освещенности, которые являются санитарными требованиями и непосредственно связаны с биологической совместимостью источников света и их влиянием

Коэффициент пульсаций освещенности К_П (4) согласно ГОСТ Р 54945-2012 [7] позволяет оценить относительную глубину колебаний освещенности

на человека. При этом нормативными характеристиками являются: минимальная величина освещенности на рабочей поверхности и максимально допустимое значение коэффициента пульсаций освещенности, включая возможность возникновения стробоскопического эффекта.

ценности в результате изменения во времени светового потока от источников света при питании их переменным током.

$$K_{П} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{\text{ср}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

где E_{\max} и E_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение освещенности за период её колебания; $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности за период колебаний T , соответствующий изменению освещенности от минимального до максимального значения.

Нормативные значения освещенности и коэффициента пульсаций на судах приводятся в различных документах (табл. 5). В таблице, в том числе, для каждого документа приведены наименьшие из допустимых значений $K_{П}$.

Таблица 5
Основные стандарты, нормирующие показатели освещенности на судах

Наименование стандарта	Область применения	К _П , %
Нормы искусственного освещения на судах морского флота № 2506-81	освещение помещений и палуб вновь строящихся и реконструируемых судов и их осветительных	10
Дополнение к Нормам № 2506-81 для морских судов флота рыбной промышленности	Распространяются на строящиеся и реконструируемые морские суда флота рыбной промышленности	20

ом непостоянства светового потока являются пульсации с высокой частотой. Данные пульсации трудноразличимы для человеческого глаза, однако обуславливают проявление стробоскопического эффекта (визуальной иллюзии неподвижности вращающихся механизмов). Пункт 6.1.4 Правил [3] устанавливает, что в помещениях и местах, которые освещаются люминесцентные лампы и в которых находятся видимые вращающиеся части механизмов, должны быть приняты меры для устранения стробоскопического эффекта.

3. Особенности функционирования светодиодных ламп

Поскольку светоизлучающий элемент в СД лампе функционирует на постоянном токе, то для работы в сетях переменного тока лампы оснащаются преобразователем энергии – драйвером, обеспечивающим на выходе требуемую величину напряжения и тока для питания светодиода (рис. 1).

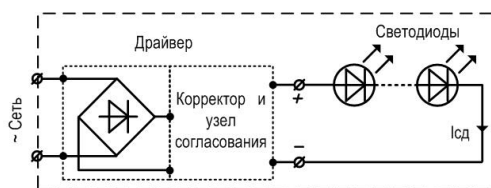


Рис. 1. Упрощенная структурная схема СД лампы

Наличие в конструкции СД ламп полупроводниковых преобразовательных устройств обуславливает нелинейный характер нагрузки данных элементов (рис. 2 а). Кроме того, конструкция драйвера и примененная элементная база определяет не только взаимосвязь параметров на входе и выходе драйвера, но и качество выпрямления тока и, как следствие, пульсации светового потока СД модуля (рис. 2 б).

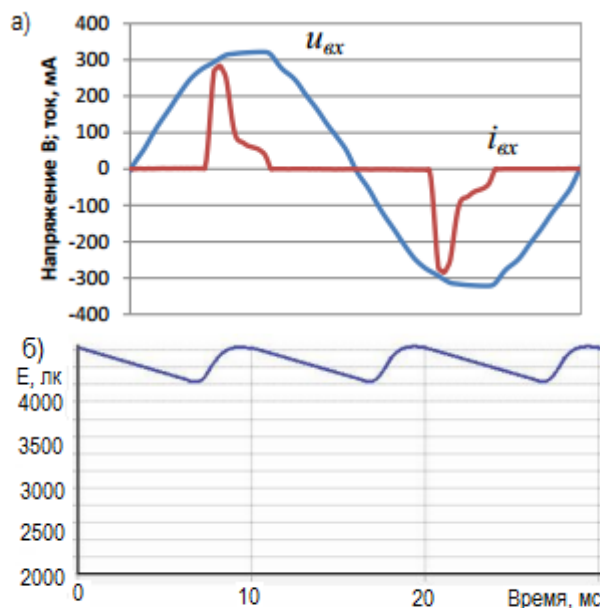


Рис. 2 – Амплитудно-временные характеристики светодиодной лампы

Таким образом, СД лампа, с одной стороны, является искажающей нагрузкой за счет эмиссии

ВГ тока в питающую сеть, а, с другой стороны, является помехочувствительным элементом, т.к. её световой поток зависит от конструкции драйвера и параметров напряжения в электрической сети.

3. Особенности систем освещения судов

Системы освещения судов являются составной частью автономных судовых ЭЭС. На промысловых судах (рис.3) системы освещения получают питание от шин главного распределительного щита (ГРЩ) через понизительные трансформаторы 0,38/0,22 кВ со схемой соединения обмоток «Δ/Y» («Y/Δ»). Кроме того, к сетям пониженного напряжения подключаются помехочувствительные элементы микропроцессорных систем контроля и управления, а так же, в ряде случаев – аппаратура навигации и связи.

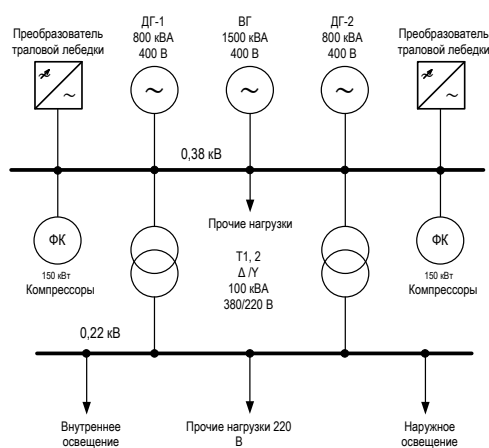


Рис. 3. Структурная схема электроэнергетической системы судна проекта В-673

Анализ систем освещения промысловых судов показывает, что они построены преимущественно с использованием световых приборов на основе ламп накаливания и люминесцентных ламп. Установленная мощность и номенклатура световых приборов определяется типом судна и степенью его энерговооруженности. Например, на траулерах проекта 1288 установленная мощность люминесцентных ламп составляет 17,7 кВт (539 шт.); ламп накаливания - 160,2 кВт (2588 шт.).

4. Несинусоидальность

Кондуктивные электромагнитные помехи в судовых электроэнергетических системах обусловлены различными искажающими нагрузками. Внедрение на судах оборудования на основе полупроводниковой преобразовательной техники приводит к росту ВГ тока в судовую сеть и, как следствие, искажению формы синусоиды питающего напряжения.

Анализ экспериментальных исследований качества электроэнергии, проведенных с использованием микропроцессорного анализатора Fluke-434 в системе освещения промыслового

судна проекта В-673 (табл. 5) в стояночном режиме, показывает, что для систем, построенных на основе люминесцентных ламп (ЛЛ) с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами (ПРА), характерны сравнительно низкие уровни несинусоидальности потребляемого тока и напряжения в судовой сети 0,22 кВ.

Таблица 5
Результаты измерений несинусоидальности напряжения и тока в системе освещения БМРТ «Алексей Аничкин»

Показатель	Напряжение			Ток		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C
K , %	1,9	2,0	2,0	5,4	3,2	3,1
$K_{(3)}$, %	0,1	0,1	0,0	2,1	1,8	1,8
$K_{(5)}$, %	1,0	1,0	1,0	1,6	1,3	1,3
$K_{(7)}$, %	1,3	1,3	1,4	1,6	1,0	0,9
$K_{(9)}$, %	0,1	0,1	0,0	0,6	0,3	0,3
$K_{(11)}$, %	0,6	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2
$K_{(13)}$, %	0,2	0,4	0,3	0,5	0,7	0,7

Экспериментальные исследования различных видов судовых светильников показывают, что более современные ЛЛ с электронным ПРА схожи по уровню эмиссии высших гармоник тока с некоторыми современными СД светильниками (табл. 6, рис 4). Следует отметить, что приведенный образец СД светильника обладает сравнительно низкими показателями эмиссии ВГ тока.

Таблица 6
Результаты исследования несинусоидальности тока, потребляемого судовыми светильниками

Образец	K_i , %	Коэффициенты гармонических составляющих тока $K_{i(n)}$, %					
		3	5	7	9	11	13
ЛЛ ЭМПРА	10,2	9,8	2,5	1,0	0,6	0,5	0,2
ЛЛ ЭПРА	17	15,1	2,7	4,5	2,7	1,9	2,2
СД	18,1	16,3	6,9	3,2	0,5	1	1,1

Таким образом, при проектировании или реконструкции систем освещения судов с использованием светодиодных светильников необходимо учитывать уровень эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть. Расчет показателей несинусоидальности напряжения обеспечивает прогнозирование влияния высших гармоник на работу электрооборудования, устройств автоматики, телемеханики и связи.

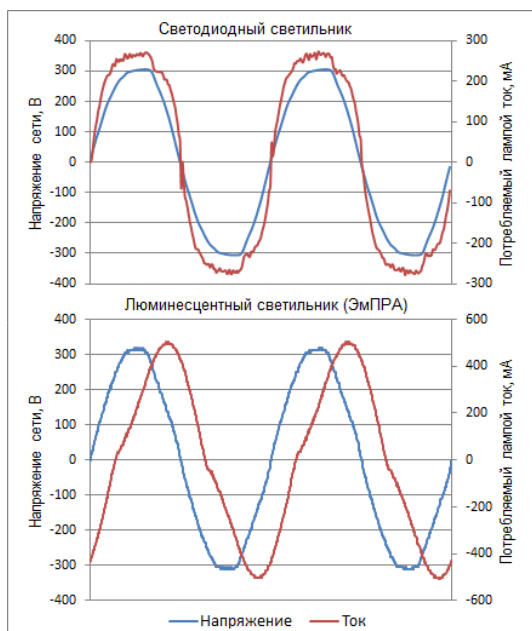


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения при для люминесцентной и светодиодной ламп

Анализ распространения высших гармоник тока с использованием расчетных методик, рекомендованных для промышленных предприятий, осложняется изолированным режимом работы судовых ЭЭС. В связи с работой системы на напряжении до 1 кВ и большой протяженностью кабельных линий необходимо учитывать емкостную проводимость относительно корпуса судна [8]. Поскольку трансформаторы в составе судовой ЭЭС имеют схему соединения «треугольник-звезда» без нулевого проводника, то протекание данных токов теоретически невозможно. Однако ввиду своей большой протяженности кабельные линии судовой электроэнергетической системы имеют емкостную проводимость относительно корпуса судна и между фазами (рис. 5), которая должна учитываться при моделировании.

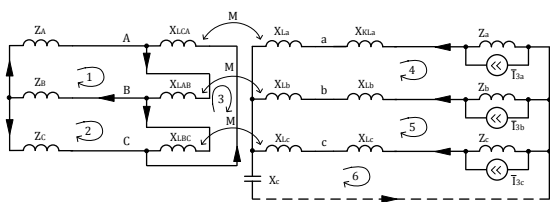


Рис. 5. Трёхлинейная расчетная схема замещения участка судовой ЭЭС для токов ВГ третьего порядка

5. Колебания напряжения и фликер

Возникновение фликера обусловлено колебаниями напряжения в электрической сети, в том числе одиночными быстрыми изменениями напряжения. Колебания напряжения возникают в результате изменений режимов работы судовой ЭЭС, запуска механизмов, функционирования преобразовательных устройств, а так же некоторых видов электрооборудования, величина по-

требляемого тока которого изменяется во времени по некоторому периодическому закону. К последним можно отнести электроприводы компрессоров, которые широко используются на промысловых судах (рис. 6)

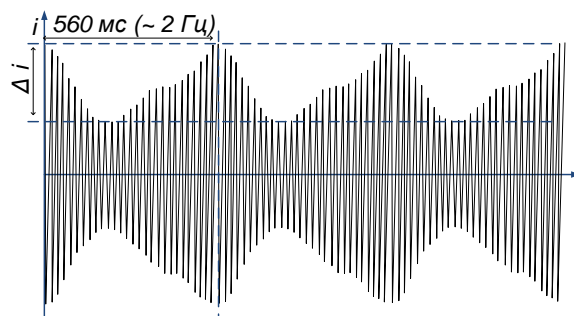


Рис. 6. Осциллограмма тока в статоре электродвигателя компрессора

Воздействие фликера на организм человека определяется соотношением частоты и размаха изменений напряжения и, как следствие, светового потока источников света. Однако изменение светового потока при колебаниях напряжения не одинакова для различных типов источников света. Для выявления зависимости светового потока ИС от величины напряжения были проведены экспериментальные исследования четырех ламп: накаливания, компактной люминесцентной и двух светодиодных (рис. 6).

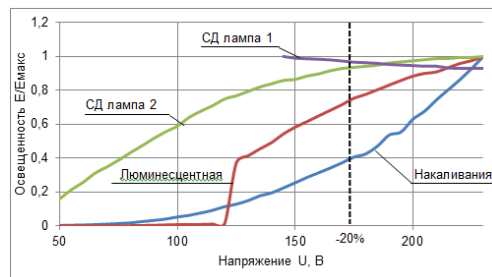


Рис. 6 – Зависимость освещенности от величины напряжения сети для ламп различных типов

Из результатов проведенных исследований следует, что при допустимом по Правилам КПМС отклонении напряжения (понижении) на 20%, в зависимости от типа источника света происходит снижение светового потока (освещенности): на 60% у лампы накаливания, на 30% у КЛЛ и не более чем на 10% у СД ламп. При этом в драйвере СД лампы № 1 реализована функция стабилизации светового потока, в отличие от образца № 2, драйвер которого позволяет изменять световой поток при помощи светорегуляторов (диммеров). Таким образом, с точки зрения обеспечения био-совместимости судового освещения в условиях наличия искажающих нагрузок СД источники света со стабилизированным световым потоком являются более предпочтительными, поскольку способны обеспечить

минимальные изменения светового потока колебаниях напряжения.

Несмотря на сравнительную устойчивость к колебаниям напряжения, в зависимости от конструкции драйвера СД источники света могут иметь значительный коэффициент пульсаций освещенности (рис. 2) и быть причиной стробоскопического эффекта.

Согласно [9] возникновение стробоскопического эффекта возможно при коэффициенте пульсаций освещенности, превышающем 10%. Частота пульсаций освещенности, при которой возникает стробоскопический эффект, определяется частотой вращения приводов и исполнительных механизмов. На морских судах в качестве приводов в большинстве случаев применяются асинхронные двигатели. Их вращение происходит с частотой несколько отличающейся в меньшую сторону от синхронных частот 50, 25, 16,6 и 12,5 об/сек. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что у рассмотренных образцов СД изделий пульсации освещенности происходят на частоте 100 Гц и более. Следовательно, возникновение стробоскопического эффекта в системах освещения на

основе СД источников света с точки зрения совпадения частот вращения механизмов и пульсации освещенности для механизмов, приводимых во вращение непосредственно асинхронными двигателями, маловероятно.

Заключение

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил выявить основные проблемы обеспечения биоэлектромагнитной совместимости судовых систем освещения. Проведенный анализ требований к электромагнитной совместимости в судовых системах выявил, что в стандартах для морских судов отсутствуют важные требования к величине дозы фликера. С использованием методов экспериментального исследования и математического моделирования рассмотрены вопросы функционирования систем освещения судов в условиях наличия искажающих нагрузок. Установлено, что световой поток всех исследованных СД ламп более устойчив к изменениям напряжения по сравнению с лампами накаливания и люминесцентными лампами.

Литература

1. Закгейм, А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) / А.Л. Закгейм // Светотехника. –2012. –№ 6. –С. 12-25.
2. Хабарова О.В. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов / О.В. Хабарова // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. –2002. –№ 5. –С. 56-66.
3. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. –2016. Издание утв. 15.09.2015 г.
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. EN 50160:2010 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems
6. ГОСТ 30804.3.2-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний
7. ГОСТ Р 54945-2012. Здания и сооружения. Методы измерения коэффициента пульсации освещенности
8. Защитные устройства в судовых и береговых электроустановках рыбной промышленности / под ред. А. П. Ксенофонтова. –Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1984. –254с.: ил.
9. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Айзенберга Ю.Б. –2-е изд., перераб. и доп. –Москва : Энергоатомиздат, 1995. –526 с. : ил.

References

1. Zakgeym, A.L. Svetodiodnye sistemy osveshcheniya: energoeffektivnost', zritel'noe vospriyatie, bezopasnost' dlya zdorov'ya (obzor.) Svetotekhnika. 2012, № 6, pp. 12-25.
2. Khabarova O.V. Bioeffektivnye chastoty i ikh svyaz' s sobstvennymi chastotami zhivykh. Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika. 2002, № 5, pp. 56-66.
3. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Izdanie utv. 15.09.2015.
4. GOST 32144-2013 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.
5. EN 50160:2010 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems
6. GOST 30804.3.2-2013 Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Emissiya garmonicheskikh sostavlyayushchikh toka tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom ne bolee 16 A. Normy i metody ispytaniy
7. GOST R 54945-2012. Zdaniya i sooruzheniya. Metody izmereniya koeffitsienta pul'satsii osveshchennosti
8. Ksenofontov A.P. Zashchitnye ustroystva v sudovykh i beregovykh elektroustanovkakh rybnoy promyshlennosti. Moscow, 1984, 254p.
9. Ayzenberga Yu.B. Spravochnaya kniga po svetotekhnike. Moscow, 1995, 526 p.

УДК 621.12.061:628.169 (043)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЕПАРАТОРОВ ПАРА СУДОВЫХ ДИСТИЛЛЯЦИОННЫХ ОПРЕСНИТЕЛЕЙ

Максим Игоревич Архипов

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

Александр Георгиевич Филонов

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

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности вертикального жалюзийного сепаратора пара и вертикального сетчатого сепаратора пара при барботажном испарении солёной воды. Исследования проводились на экспериментальном стенде Калининградского государственного технического университета (КГТУ). Экспериментальный стенд состоит из барботажного испарителя с электрическим обогревом, поворота, экспериментального участка и змеевикового конденсатора.

Эффективность сепараторов оценивалась по влажности пара после сепаратора, которая измерялась по солевой методике. Вертикальный сетчатый сепаратор сечением 100х100 мм изготавливался из вязаной сетки, применяемой на зарубежных опреснителях. Вертикальный жалюзийный сепаратор сечением 100х100 мм устанавливался в камерах испарения судовых опреснителей 2Д2М и 6А-25 конструкции КГТУ.

В результате исследований были получены формулы для определения влажности пара после вертикальных сепараторов в зависимости от основных режимных параметров при барботажном кипении солёной воды.

Установлено, что влажность пара после вертикального сетчатого сепаратора изготовленного из стандартной вязаной сетки при давлениях пара $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа примерно в (2-3) раза ниже, чем после вертикального жалюзийного сепаратора. 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, жалюзийный сепаратор, барботажное кипение, сетчатый сепаратор, капельный унос.

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF VERTICAL STEAM SEPARATORS FOR SHIP DISTILLATION DESALINATION PLANTS

Maksim Arkhipov

postgraduate of ship power plants and heat power engineering department
Kaliningrad State Technical University
Soviet Avenue 1, Kaliningrad, 236000, Russian Federation
e-mail: gromus08@bk.ru

Alexandr Filonov

PhD, associate professor,
head of the ship power plants and heat power engineering department
Kaliningrad State Technical University
Soviet Avenue 1, Kaliningrad, 236000, Russian Federation
e-mail: alexandr.filonov@klgtu

Abstract

The article presents the results of experimental investigation of the vertical chevron plates steam separator and a vertical steam demister efficiency at barbotage evaporation of salt water. The research

was carried out at the Kaliningrad State Technical University (KSTU) experimental stand. The experimental stand consists of electric heating barbotage evaporator, experimental section and a condenser.

The separators efficiency was determined by the steam humidity after the separators, which was measured by the salt method. Vertical steam demister with a cross-section 100x100 mm was made of wire mesh, used on foreign desalination plants. A vertical chevron plates separator with a cross-section 100x100 mm was installed in the evaporation chambers of ship desalination plants 2D2M and 6A-25 design of KSTU.

As a result of the research, formulas for determining the steam humidity after vertical steam separators, depending on the main regime parameters at barbotage evaporation of salt water were obtained. It was determined that at steam pressures $P = 0.101$ MPa and 0.0199 MPa the steam humidity after a vertical demister made from a standard wire mesh is approximately (2-3) times lower, than after a vertical chevron plates separator. The formulas for calculating the steam humidity after the separator at the inlet of the condenser can be used to determine the distillate salinity in design evaporation chambers of ship desalination plants.

Key words: steam humidity, chevron plates separator, wire mesh separator, darbotage boiling, liquid entrainment.

Введение

Известно, что солесодержание дистиллята получаемого в судовых опреснительных установках при отсутствии присоса охлаждающей воды в полость конденсатора определяется влажностью вторичного пара, поступающего в конденсатор после отделения капель кипящей морской воды в паросепарационных устройствах опреснителя.

Предварительная грубая очистка пара от крупных капель в камерах испарения производится обычно с помощью отбойных щитов, или козырьков. Окончательная, тонкая очистка пара от мелких, трудноулавливаемых, транспортируемых паром капель в отечественных и зарубежных опреснителях, вырабатывающих высококачественный дистиллят, осуществляется в жалюзийных или сетчатых сепараторах [1-4].

К настоящему времени надёжная методика определения эффективности работы жалюзийных и сетчатых сепараторов отсутствует из-за нехватки достоверных данных, обычно получаемых на экспериментальных установках.

Большинство стендовых исследований по определению конечной влажности пара после сепараторов тонкой очистки $\omega_{\bar{e}}$ проводилось ранее при атмосферном давлении, или давлениях свыше $0,101$ МПа для стационарных испарителей и паровых котлов тепловых электростанций [5-7].

Поэтому полученные результаты не могут быть использованы при для проектирования паросепарационных устройств судовых вакуумных опреснителей

В связи с этим, в Калининградском государственном техническом университете был разработан вакуумный экспериментальный стенд, конструкция которого позволяет определять влажность пара и эффективность жалюзийных и сетчатых сепараторов по солевой методике, через коэффициент уноса иона натрия и количество влаги, оседающей на стенках экспериментального участка стенда,

улавливаемой в сборниках-ловушках (рис.1) [8, 9].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния режимных параметров судовых опреснителей на величину $\omega_{\bar{e}}$ для вертикальных жалюзийных и сетчатых сепараторов при барботажном кипении солёной воды.

1. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследуемые сепараторы устанавливались после поворота в сепарационной камере на высоте парового объёма от «зеркала испарения» $H_{по} = 0,45$ м. Влажность пара на входе в поворот перед сепарационной камерой $\omega_{\bar{i}}$, на входе в сепаратор $\omega_{\bar{n}}$ и после сепаратора, на входе в конденсатор определялась по формулам

$$\omega_{\bar{i}} = \omega_{\bar{n}} + \frac{G_{\bar{i}} \cdot S_{\bar{i}}}{(D + G_{\bar{i}}) \cdot S_{\bar{\delta}}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

$$\omega_{\bar{n}} = \omega_{\bar{e}} + \frac{G_{\bar{n}} \cdot S_{\bar{n}}}{(D + G_{\bar{n}}) \cdot S_{\bar{\delta}}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

$$\omega_{\bar{e}} = \frac{S_{\bar{e}}}{S_{\bar{\delta}}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

где: $S_{\bar{n}}, S_{\bar{i}}$ - солёность проб по иону натрия, отбираемых из ловушек сепарационной камеры и поворота соответственно, мг/л;

$S_{\bar{e}}$ и $S_{\bar{\delta}}$ - солёность отобранных проб конденсата и испаряемого рассола по иону натрия, мг/л;

D - производительность стенда по конденсату, кг/ч;

$G_{\bar{n}}, G_{\bar{i}}$ - расход пробы, отбираемой из ловушек камеры, поворота, и испарителя, кг/ч.

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

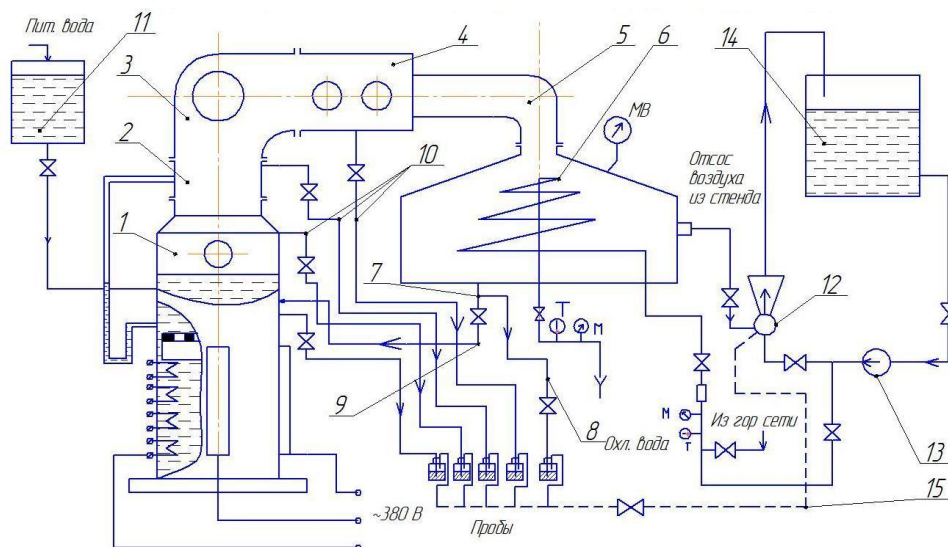


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

1 – испаритель; 2 – корпус 100×100 мм; 3 – поворот радиусом 100 мм; 4 – сепарационная камера; 5 – соединительный патрубок D_y 50; 6 – конденсатор; 7 – слив конденсата; 8 – узел отбора проб конденсата; 9 – клапан D_y 15; 10 – отбор проб влаги, улавливаемой ловушками стенда; 11 – бак с питательной водой; 12 – водо-воздушный эжектор; 13 – циркуляционный насос; 14 – бак с циркуляционной водой; 15 – отсос воздуха.

Концентрация ионов натрия в анализируемых пробах измерялась пламенным фотометром ПАЖ-2 с пределом обнаружения 2 мкг/л.

Действительный, физический уровень испаряемой воды оставался во всех опытах постоянным и контролировался по иллюминатору. 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.

Конечная влажность пара после сепараторов ω_g определялась по солёности пробы S_k , отбираемой из полностью конденсируемого потока пара. В связи с этим, конструкция конденсатора должна была исключать возможность попадания ионов натрия вместе с охлаждающей водой в полость конденсации пара. Вторичный пар после прохождения через исследуемый сепаратор, конденсировался под полным рабочим давлением на наружной поверхности двенадцати параллельно подключенных змеевиков, которые изготавливались из цельнотянутых труб наружным диаметром 12 мм.

Входы и выходы змеевиков подсоединялись к входному и выходному коллекторам охлаждающей воды через сальниковые уплотнения с резиновой прокладкой в корпусе конденсатора. Все детали стенда и пробоотборные емкости изготавливались из нержавеющей стали.

Перед началом проведения исследований стенд с новым конденсатором, запитанный пресной водой,

отработал около 500 часов при максимальной нагрузке для отмывки конденсатора. За это время солёность дистиллята снижалась до 2-3 мкг/кг по иону натрия. Исследования проводились в диапазоне солёности испаряемой воды $S_p = (1400-90000)$ мг/л по NaCl. Поэтому перед проведением экспериментов на пресной воде конденсатор стенда также отмывался до постоянной минимальной солёности дистиллята.

На рис. 2 представлена кривая снижения солёности пробы дистиллята, которая отбиралась из конденсатора во время отмывки стенда после серии опытов на солёной воде. Как видно из рис. 2, общее время рассоливания конденсатора и пробоотборного тракта составляло около 100 часов.

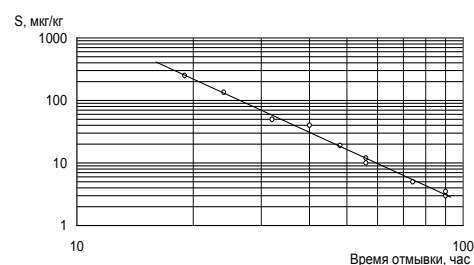


Рис. 2. Снижение концентрации натрия в пробе дистиллята в зависимости от времени отмывки конденсатора

В последствии, для ускорения отмывки конденсатор два раза в сутки заполнялся бидистиллятом, для получения которого тщательно промытый испаритель стенда запитывался чистой дистиллированной водой, а очистка вторичного пара, получаемого из дистиллята, происходила в вертикальном сетчатом или жалюзийном каплеуловителе. Общее время отмывки конденсатора таким образом удалось сократить до 50-70 часов в зависимости от длительности предшествующих опытов на солёной воде.

Бидистиллят, получаемый на стенде с отмытым конденсатором, использовался в качестве нулево-

го раствора для приготовления стандартных растворов к пламенному фотометру ПАЖ-2. Содержание натрия в нём оказывалось ниже предела обнаружения ПАЖ-2. После прогрева стенда и выхода его на режим производилась отмывка конденсатора и узла отбора проб в течении 0,5 часа с целью предотвращения сорбции иона натрия материалом стенда, пробоотборными линиями и емкостями. Подробное описание методики экспериментов и расчета конструкции стенда приводится в работе [10].

2. Исследуемые сепараторы

Вертикальный жалюзийный сепаратор сечением 100 X 100 мм изготавливался из штампованных пластин длиной 90 мм, с шагом 10 мм (рис. 3.). Геометрические характеристики испытываемого профиля криволинейного канала жалюзи представлены на рис. 4.

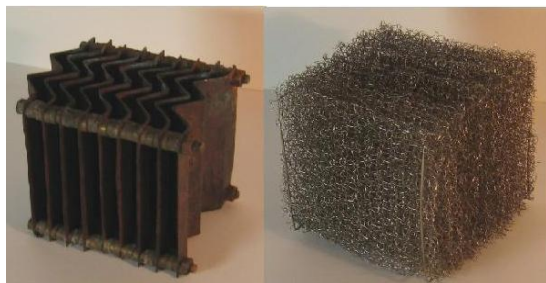


Рис. 3. Исследуемые вертикальный жалюзийный и вертикальный сетчатый сепараторы

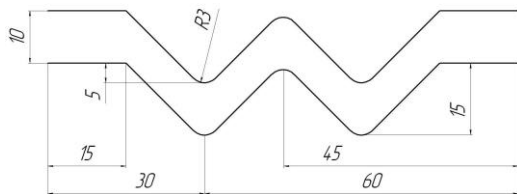


Рис. 4. Геометрические характеристики профиля криволинейного канала исследуемого вертикального жалюзийного сепаратора

Сепараторы этого типа, размещались в камерах испарения судовых опреснителей 2Д2М и 6А-25, которые разрабатывались в КГТУи устанавливались на судах промыслового флота.

Вертикальный сетчатый сепаратор сечением 100x100 мм изготавливались из вязаной гофрированной сетки типа «стандарт» с диаметром рукава 160 мм, применяемой на зарубежных судовых опреснителях (рис.3). Размер ячейки сетки составлял 5x5 мм, высота гофр – 4 мм, шаг гофр – 9 мм, диаметр проволоки – 0,22 мм. Количество слоёв сетки в опытах при $P = 0,101$ МПа и 0,0199 МПа составляло $n_c = 35$ (плотность сетки - 135 кг/м³). Толщина пакета сетки - 100 мм.

3. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Основным режимным параметром влияющим на эффективность сепаратора являлась скорость пара

в сепараторе W_c . На рис. 5-6. представлены результаты экспериментальных исследований зависимости влажности пара после вертикальных сепараторов от скорости W_c , полученные на солёной воде при давлениях $P = 0,101$ МПа и 0,0199 МПа и постоянной приведенной скорости пара в испарителе $W_0 = 0,33$ м/с и 1,6 м/с соответственно. Там же приводятся значения влажности пара на входе в сепаратор $\omega_{\tilde{n}}$ и перед поворотом потока пара на входе в сепарационную камеру $\omega_{\tilde{r}}$.

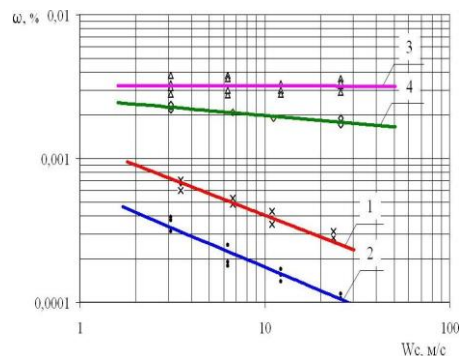


Рис. 5. Влажность пара после вертикального жалюзийного сепаратора и вертикальной сетки при $P = 0,101$ МПа, $W_0 = 0,33$ м/с: 1-жалюзийный сепаратор, 2-вертикальная сетка, 3 – влажность пара на входе в сепаратор, 4 - влажность пара на входе в поворот

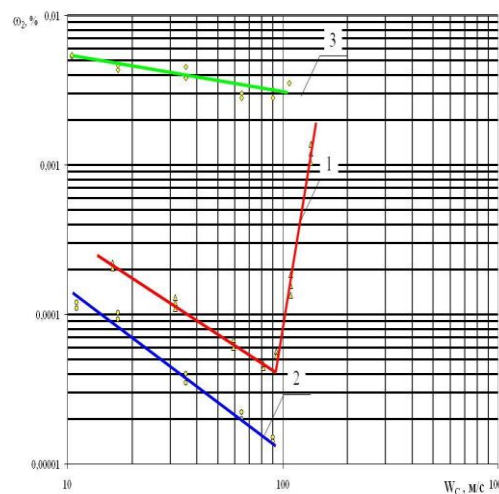


Рис. 6. Влажность пара после вертикального жалюзийного сепаратора и вертикальной сетки при $P = 0,0199$ МПа, $W_0 = 1,6$ м/с: 1-жалюзийный сепаратор, 2-вертикальная сетка, 3 – влажность пара на входе в сепаратор, 4 - влажность пара на входе в поворот

Скорость пара в жалюзийном сепараторе W_c изменялась путём перекрытия входного сечения сепаратора. В исследованиях вертикальной сетки значения W_c изменялись за счет применения вырезанных элементов сетки с меньшим поперечным сечением. Поэтому значения влажности пара на входе в испытываемые сепараторы $\omega_{\tilde{n}}$ на рис. (5-6) несколько снижались из-за осаждения незначительного количества влаги на пороге, перекрывающем входное сечение сепаратора.

Из рисунков 5-6 видно, что с увеличением приведенной скорости пара в испарителе W_0 и сниже-

нием давления пара при постоянной скорости пара в сепараторе W_c эффективность сепараторов увеличивалась. Значения влажности пара после вертикального сетчатого сепаратора в экспериментах при $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа оказались в (2-3) ниже, чем после вертикального жалюзийного сепаратора.

На рис. 7 приведены значения влажности пара ω_i , $\omega_{\bar{n}}$, измеренные перед вертикальными сепараторами, а также значения конечной влажности после сепараторов, полученные при постоянной высоте парового объёма и действительном уровне воды в испарителе в зависимости от содержания испаряемой воды $S_p = (1400-90000)$ мг/л по NaCl.

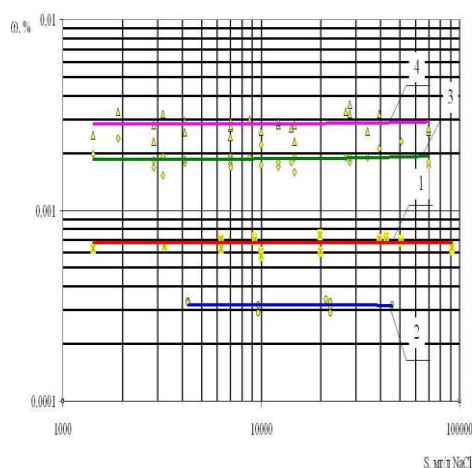


Рис. 7. Влажность пара после вертикального жалюзийного сепаратора и вертикальной сетки в зависимости от содержания испаряемой воды при $P = 0,101$ МПа, $W_o = 0,33$ м/с, $W_c = 3,1$ м/с:

1-жалюзийный сепаратор, 2-вертикальная сетка, 3 – влажность пара на входе в сепаратор, 4 - влажность пара на входе в поворот

Из рис. 7 видно, что в исследуемом диапазоне S_p , при постоянном действительном уровне воды в испарителе влажность пара после вертикального жалюзийного сепаратора и вертикальной сетки не зависит от содержания испаряемой воды.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила установить зависимости:

- для определения влажности пара после вертикального сетчатого сепаратора:

а) для приведенной скорости пара в камере испарения менее $0,5$ м/с

$$\omega_{\bar{n}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-3}}{(W_i)^{0,34} \cdot (W_c)^{0,5} \cdot (n_c)^{0,265}} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22}, \% \quad (4)$$

б) для приведенной скорости пара в камере испарения более $1,0$ м/с

$$\omega_{\bar{n}} = \frac{0,247}{(W_i)^{0,68} \cdot (W_{\bar{n}}) \cdot (n_c)^{0,503}} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \% \quad (5)$$

- для определения влажности пара после вертикального жалюзийного сепаратора:

а) для приведенной скорости пара в камере испарения менее $0,5$ м/с

$$\omega_{\bar{n}} = \frac{4,45 \cdot 10^{-3}}{(W_i)^{0,34} \cdot (W_c)^{0,5}} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22}, \% \quad (6)$$

б) для приведенной скорости пара в камере испарения более $1,0$ м/с

$$\omega_{\bar{n}} = \frac{0,114}{(W_i)^{0,68} \cdot (W_{\bar{n}})} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \% \quad (7)$$

где ρ' и ρ'' - плотности воды и пара соответственно.

Отклонения экспериментальных данных от расчетных формул (4-7) не превышает 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.

Сопоставление формул (4-5) с формулами (6-7) показывает, что зависимость конечной влажности пара после вертикальных сетчатых сепараторов и вертикальных жалюзийных сепараторов от основных режимных параметров имеет одинаковый характер. При малых значениях приведенной скорости пара W_o в опытах на атмосферном давлении влияние скорости пара в сепараторе W_c на величину $\omega_{\bar{n}}$ проявляется слабее.

Сравнение результатов расчета влажности пара после вертикального жалюзийного сепаратора по формуле (6) с экспериментальными данными работы [6] при $P = 0,101$ МПа показывает их удовлетворительную сходимость.

Заключение

Экспериментально установлено, что влажность пара после вертикального сетчатого сепаратора, изготовленного из стандартной вязаной сетки, применяемой на судовых опреснителях при барботажном кипении солёной воды и давлениях пара $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа примерно в (2-3) раза ниже, чем после вертикального жалюзийного сепаратора.

Показано, что содержание испаряемой воды практически не влияет на влажность пара после вертикальных сепараторов, если действительный уровень испаряемой воды остаётся постоянным.

Получены зависимости для расчета влажности вторичного пара после вертикальных жалюзийного и сетчатого сепараторов на входе в конденсатор в судовых вакуумных опреснителях, в которых значения приведенной скорости пара превышают 1 м/с. Формулы позволяют определить содержание 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 промыслового 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 / Тихонов Владимир Михайлович: 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 / Ильющенко Виктор Васильевич: 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 / Девянин Вячеслав Алексеевич: М., 1985. 20 с.
7. Рафаелян А.В. Повышение эффективности сепарирующих устройств аппаратов барботажного типа ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Рафаэлян Артак Владимирович: М., 1989. 18 с.
8. Филонов А.Г. Экспериментальное исследование влияния солесодержания испаряемой воды на влажность пара при барботажном кипении // Известия Калининградского государственного технического университета. 2011. № 21. с. 121-126.
9. Филонов А.Г., Юрков С.В. Исследование эффективности горизонтального жалюзийного сепаратора пара с различным числом полувогн в пластинах // Известия Калининградского государственного технического университета. 2013. № 29. с. 215-223.
10. Филонов А.Г., Архипов М.И. Методика исследования эффективности паросепарационных устройств судовых паровых котлов и опреснительных установок // Материалы IV Международного Балтийского Морского Форума.: Калининград, 2016. с.363-368.

References

1. Kovalenko V.F., Lukin G.Ya. Sudovye vodoopresnitel'nye ustanovki [Ship desalination plants]. L.: Sudostroenie, 1970. 304 p. (In Russian)
2. Lukin G.Ya., Kolesnik N.N. Opresnitel'nye ustanovki promyslovogo flota [Commercial fleet desalination plants]. 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 [Experimental investigation of liquid entrainment and droplets separation in vacuum desalination plants]. M., 1978. 20 p. (In Russian)
4. Il'yushchenko V.V. Zakonomernosti adiabatnogo paroobrazovaniya, unosa i separatsii vlagi v opresnitel'nykh ustanovkakh mgnovennogo vskipaniya. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Regularity of adiabatic evaporation, liquid entrainment and moisture separation in FLASH desalination plants]. Sverdlovsk, 1988. 24 p. (In Russian)
5. Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii [Hydrodynamics and heat transfer during evaporation]. 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. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of the optimal operating conditions of the chevron plates separators for steam generating plants of TPPs and NPPs]. M., 1985. 20 p. (In Russian)
7. Rafaelyan A.V. Povyshenie effektivnosti separiruyushchikh ustroystv apparatov barbotazhnogo tipa TES i AES. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement efficiency of separation devices for TPPs and NPPs barbotage type apparatus]. M., 1989. 18 p. (In Russian)
8. Filonov A.G. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya solesoderzhaniya isparyaemoy vody na vlazhnost' para pri barbotazhnom kipenii [Experimental study of salinity evaporated water effect of steam humidity at barbotage boiling]. Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Kaliningrad State Technical University News]. 2011. № 21. p. 121-126. (In Russian)
9. Filonov A.G., Yurkov S.V. Issledovanie effektivnosti gorizonta'nogo zhalyuziynogo separatora para s razlichnym chislom poluvogn v plastinakh [Investigation of the efficiency of a horizontal chevron plates steam separator with a different number of half-waves in plates]. Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Kaliningrad State Technical University News]. 2013. № 29. p. 215-223. (In Russian)
10. Filonov A.G., Arkhipov M.I. Materialy IV Mezhdunarodnogo Baltiyskogo Morskogo Foruma "Metodika issledovaniya effektivnosti paroseparatsionnykh ustroystv sudovykh parovykh kotlov i opresnitel'nykh ustanovok" (Materials of the IV International Baltic Sea Forum "Methods for efficiency investigating of steam separators for ship steam boilers and desalination plants"). Kaliningrad, 2016. p.363-368. (In Russian)

УДК 621.436

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В СУДОВЫХ ДВС И МЕТОДОВ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Виктор Иванович Одинцов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок
«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: seu@bga.gazinter.net

Вадим Вадимович Полевой

студент кафедры судовых энергетических установок
«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: seu@bga.gazinter.net

Никита Васильевич Свиридюк

аспирант кафедры судовых энергетических установок
«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: seu@bga.gazinter.net

Аннотация

В работе проведен анализ условий эксплуатации судовых двигателей внутреннего сгорания, отличающихся гидрометеорологическими факторами и применением тяжелых сортов топлива содержащих вредные соединения, увеличивающих износы деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ). В результате их совместного влияния, параметры рабочего процесса отклоняются от проектных и сдаточных значений. Что сопровождается увеличением механических и термических напряжений.

Удельный тепловой поток вычисляется по законам Ньютона и Стефана-Больцмана, включающих разность температур (рабочее тело-поверхность) и коэффициент теплоотдачи, который должен учитывать влияние конструктивных особенностей и параметров рабочего процесса двигателей. Разработанные, к настоящему времени, расчетные зависимости зачастую справедливы для исследованного двигателя и близких к нему по конструкции и параметрам рабочего процесса. Недостатками разработанных зависимостей являются отсутствие учета: влияния отношения охлаждаемой поверхности деталей ЦПГ к рабочему объему цилиндра; продолжительность процесса сгорания учитывается только через текущие давления и среднемассовые температуры. В то время как в период сгорания происходит особенно интенсивный отвод тепла излучением.

Приведены уравнения для расчета процесса сгорания, учитывающие влияние ряда действующих факторов и ссылки на литературу.

Проведен расчет коэффициента теплоотдачи для одной точки рабочего процесса малооборотного двигателя по методам Г. Эйхельберга и Нуссельта-Брилинга. Установлены причины их расхождения. Предложена зависимость, учитывающая, дополнительно, влияние продолжительности процесса сгорания, относительной поверхности охлаждения и основанная на сравнении действующих факторов.

Ключевые слова: судовые дизели, цилиндро-поршневая группа, процесс сгорания, коэффициент теплоотдачи, теплообмен.

ANALYSIS OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN MARINE DIESEL ENGINES AND METHODS OF ITS MODELING

Victor Odintsov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ship Power Plants
Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, Molodeznaya str., 6
E-mail: seu@bga.gazinter.net

Vadim Polevoy

Student of the ship power plants department
Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, Molodeznaya str., 6
E-mail: seu@bga.gazinter.net

Nikita Sviridyuk

Post-graduate student of the Department of Ship Power Plants
Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, Molodeznaya str., 6
E-mail: seu@bga.gazinter.net

Abstract

The analysis of operating conditions of ship internal combustion engines differing by hydrometeorological factors and application of heavy grades of fuel containing harmful compounds, increasing wear of parts of the cylinder-piston group (CPG) is carried out in the paper. As a result of their combined influence the parameters of the workflow deviate from design and delivery values. The process is accompanied by an increase in mechanical and thermal stresses.

The heat flow rate is calculated according to the laws of Newton and Stefan-Boltzmann including the temperature difference (working body-surface) and the heat transfer coefficient which must take into account the influence of design features and parameters of the engine working process. The calculated dependencies developed to date are often valid for the engine under study and those close to it in terms of design and process parameters. The disadvantages of the developed dependencies are the lack of taking into account: the effect of the ratio of the cooled surface of the cylinder-piston group (GPG) to the working(displacement) volume of the cylinder; duration of the combustion process is taken into account only through the current pressures and the average mass temperatures. While in the period of combustion there is a particularly intense heat dissipation by radiation.

Equations for calculating the combustion process are given taking into account the influence of a number of operating factors.

The calculation of the coefficient of heat transfer for one point of the working process of a low-speed engine is carried out using the methods of G. Eichelberg and Nusselt-Briling. The reasons for their divergence are established. The method is proposed that takes into account, in addition, the effect of the duration of the combustion process, the relative cooling surface, and is based on a comparison of the operating factors.

Key words: marine diesels, cylinder-piston group, combustion process, heat transfer coefficient, heat exchange.

Введение

Конструктивными особенностями судовых ДВС являются применение дизельного цикла, величина геометрических характеристик и частот вращения коленчатого вала. Так, например, диаметр цилиндрических втулок достигает 1 метра, а отношение хода поршня к диаметру цилиндра – до 4,2. Кроме того, при частотах вращения коленчатого вала $n > 750$ 1/мин. судовые дизели считаются высокооборотными.

Наибольшее распространение на морском и рыбопромысловом флоте получили дизели с наддувом. Температура, давление и относительная влажность воздуха зависят от района работы в Мировом океане и отличаются от нормальных значений, для которых разработан двигатель.

Широкое применение тяжелых сортов топлива, отличающихся высоким содержанием серы (до 4,5%, в открытых районах Мирового океана), ванадия и натрия, кокса и асфальтенов вызывают повышенный износ деталей цилиндрично-поршневой

группы (ЦПГ) и прецизионных элементов топливной аппаратуры, прогорание выпускных клапанов. Что, как следствие, приводит к потере части заряда воздуха, нарушению качества процессов смесеобразования и сгорания с выделением большого количества сажи, повышающей сопротивление в период газообмена. Увеличивается теплонапряженность деталей ЦПГ, запасы прочности, по которой составляют 3-5%, а по механическим напряжением – до 30% [1].

В этих условиях большое значение имеет получение (экспериментальным или расчетным путем) и применение показателей тепловой напряженности. Величина которых, также, существенно зависит от продолжительности процесса сгорания [2].

Целью настоящей работы является анализ методов расчета процесса сгорания, необходимого для вычисления параметров рабочего процесса и коэффициента теплоотдачи.

сгорание топлива в мало- и среднеоборотных дизелях в период топливopодачи, а после её окончания – в отдельных макрoбъемах [5].

Продолжительность процесса сгорания составляет до 40-50 °ПКВ в современных дизелях и до 80-90 °ПКВ в устаревших конструкциях. При

1. Процесс сгорания

В судовых дизелях, преимущественно, применяется струйный (объемный) способ смесеобразования. Наиболее мелкие капли располагаются в поверхностных слоях [3,4], где и происходит

этом температура рабочего тела в зонах сгорания (в зависимости от их расположения относительно ВМТ) равняется 2600-2900 К [6,7]. Следовательно, продолжительность процесса сгорания является дополнительным фактором, влияющим

на величину коэффициента теплоотдачи, как это отметил профессор Н.А. Иващенко.

Для расчета относительного количества сгоревшего топлива предложено уравнение (1) [8]:

$$x = 1 - \exp \left[-B \cdot C \cdot \tau_i \cdot E \cdot K^{0,2} (\tau_i / \tau_z)^{m+1} \right] \quad (1)$$

где В, С – комплексы параметров, характеризующие процесс распыливания топлива;

Д, Е – комплексы параметров, характеризующие состояние рабочего тела в цилиндре дизеля и продолжительность процесса сгорания;

К – показатель, характеризующий использование объема камеры сгорания в период топливоподачи;

В комплексах, входящих в уравнении (1), содержатся следующие параметры: диаметр и количество сопловых отверстий в форсунке и количество форсунок в одном цилиндре ДВС, цикловая подача топлива, среднее давление и температура рабочего тела в цилиндре ДВС в период сгорания, объем камеры сгорания, среднее давление в форсунке в период топливоподачи, период задержки воспламенения топлива, продолжительность топливоподачи, воздушно-топливное отношение при сгорании, коэффициент расхода форсунки, плотность, динамическая вязкость топлива и коэффициент его поверхностного натяжения, угол струи топлива.

Для расчета периода задержки воспламенения топлива, продолжительности процесса сгорания и индикаторного процесса, также разрабо-

τ_i – отрезок времени от начала процесса сгорания до i -го момента;

τ_z – продолжительность процесса сгорания;

$m = 1,88$ – показатель.

таны зависимости, учитывающие влияние приведенных выше факторов [8].

Уравнения представлены в относительном виде, как отношение действующего фактора в исследуемом дизеле к фактору известного, по экспериментальным данным, другого двигателя, принятого за эталон. Это снижает необходимость в дополнительных экспериментах, для уточнения каких-либо коэффициентов.

В методах профессоров И.И. Вибе [9], Е.А. Лазарева и других, влияние действующих факторов учитывается заданием показателя характера сгорания « m », определяемого по результатам эксперимента. Известны и другие, более сложные, подходы, основанные на решении гидро- и газодинамических уравнений.

2. Методы расчета коэффициента теплоотдачи в судовых дизелях

Для расчета удельного теплового потока исходными являются уравнения Ньютона и Стефана-Больцмана [10]. В соответствии с которыми удельный тепловой поток зависит от температурного перепада и коэффициента теплоотдачи от газов в стенки деталей ЦПГ. Последний учитывает влияние геометрических характеристик дизе-

ля, параметров рабочего процесса, средней скорости поршня. В связи с большим разнообразием приведенных выше параметров, каждый из авторов получил зависимости применительно к исследованному дизелю и близким к нему.

Для судовых дизелей известна зависимость (2), предложенная Г. Эйхельбергом и дополненная влиянием давления наддува [10]:

$$\alpha_r = 13,85 \sqrt{pT} \sqrt[3]{c_m} \sqrt[4]{p_k} \quad (2)$$

где Р – давление рабочего тела, МПа;

Т – среднемассовая температура рабочего тела, К;

Среднемассовая температура вычисляется из уравнения состояния в предположении, что тепло выделившееся при сгорании любой бесконечно малой части цикловой подачи топлива, мгновенно нагревает всю массу рабочего тела в цилиндре. В методе Пфлаума разработаны уравнения, учитывающие различную интенсивность подвода теплоты в поршень, крышку и втулку цилиндра [11].

Распространенной является, также, формула Г. Вошни [12]. Дополнительно, в которой учитываются параметры заряда воздуха в цилиндре после закрытия клапанов, рабочий и эффектив-

c_m – средняя скорость поршня;

p_k – давление наддува.

ный объем цилиндра, его диаметр, результаты прокрутки без подачи топлива, окружная скорость воздуха. Однако температура рабочего тела, в отличие от других методов расчета, действует на снижение α_r .

В то же время известно, что количество теряемой теплоты в систему охлаждения зависит от величины поверхности охлаждения, среднего эффективного давления, продолжительности процесса сгорания, параметров рабочего тела в цилиндре, коэффициента избытка воздуха при

сгорании. Некоторые из этих факторов не учитываются в приведенных выше формулах.

Для примера сравним методы расчета коэффициентов теплоотдачи от рабочего тела в стенке деталей ЦПГ, разработанных Г. Эйхельбергом и Нуссельтом-Брилингом. Параметры исследованного Г. Эйхельбергом двигателя: диаметр цилиндра 380 мм, ход поршня 460 мм, частота вращения коленчатого вала 400 1/мин., среднее эффективное давление 7,8 бара. Во втором случае, те же параметры соответственно равны: 310 мм, 460 мм, 200 1/мин., 2,37 бара [13]. Средние скорости поршня соответственно 5,33 м/с и 2,67 м/с. Влияние давления наддува на коэффициент теплоотдачи от газов в стенке деталей ЦПГ не учитывалось. Относительная поверхность охлаждения

F/V , в двигателе Г. Эйхельберга, в 1,125 раза меньше, а среднее эффективное давление больше в 2,6 раза. Данные по коэффициентам избытка воздуха при сгорании и его продолжительность, удельному расходу топлива - отсутствуют.

Выполнены расчеты для точки, характеризующейся следующими параметрами рабочего тела: давлением – 10 мПа, температурой – 1650 К, средней температурой стенок деталей ЦПГ – 500 К. Средняя скорость поршня 6,97 м/с. Коэффициент теплоотдачи по методу Г. Эйхельберга составляет 6819 кДж/м² час · град., по методу Нуссельта-Брининга -- 4009 кДж/м² час · град. Сравнение проводилось по формуле (3):

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_p} = \alpha_{\varepsilon} \cdot \frac{(F/V)_n}{(F/V)_\varepsilon} \cdot \frac{\varphi_{\text{зп}}}{\varphi_{\text{зэ}}} \cdot \frac{b_{\text{еп}}}{b_{\text{еэ}}} \cdot \left(\frac{C_m}{C_n}\right)^{0.65} \cdot f\left(\frac{P_{\text{ен}}}{P_{\text{еэ}}}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_{\varepsilon}}{\alpha_n}\right)^{0.5}, \quad (3)$$

где F , V – поверхность охлаждения и объем цилиндра;

$\varphi_{\text{з}}$ – продолжительность процесса сгорания;

$b_{\text{е}}$ – удельный расход топлива;

$P_{\text{е}}$ – среднее эффективное давление;

Параметры с индексами «п» относятся к двигателю Нуссельта-Брининга, а параметры с индексами «э» – к двигателю Г. Эйхельберга, принятому за эталон.

Заключение

Установлены причины некоторого разнообразия формул, для расчета коэффициента теплоотдачи от рабочего тела в стенке деталей ЦПГ, заключающиеся в различии геометрических характеристик и параметров рабочего процесса опытных дизелей.

Приведено уравнение для расчета относительного количества сгоревшего топлива и ссылки на зависимости для вычисления остальных

α – коэффициент избытка воздуха при сгорании;

$f\left(\frac{P_{\text{ен}}}{P_{\text{еэ}}}\right)$ – функция, определяемая по графикам из [13].

Расчетное значение коэффициента теплоотдачи, по методу Нуссельта-Брининга, равно 3369 кДж/м² час · град., что ≈ на 16% меньше вычисленного по их формуле и объясняется отсутствием приведенных выше данных. характеристик процесса сгорания и индикаторного процесса.

Благодарности

Авторы благодарят Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР АААА-А17-117041810023-0).

Литература

1. Васькевич Ф. А. Повышение эффективности эксплуатации главных судовых дизелей методами регулирования и диагностики топливной аппаратуры. СПб: 2009. 267 с.
2. Иванов Л. А. Теплонапряженность и эксплуатационная надежность цилиндро-поршневой группы судового дизеля: практическое пособие. Мурманск: Мурман. кн. изд-во, 1974. 208 с.
3. Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1974. 284 с.
4. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
5. Свиридов Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972. 224 с.
6. Дьяченко Н.Х., Костин А.К. и др. Теория двигателей внутреннего сгорания /под ред. Дьяченко. Л.: Машиностроение, 1974. 552 с.
7. Одинцов В.И., Одинцов В.Б., Свиридюк Н.В. Метод моделирования нестационарного распределения температур в цилиндрах дизелей рыбопромыслового флота // «Известия» БГАРФ ФГБОУ «КГТУ». 2016. Т. 37. № 3. 150 с.
8. Одинцов В. И. Рабочий процесс судовых ДВС: монография. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. 140 с.
9. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей. М.: Машиностроение, 1962. 300 с.
10. Ваншейдт В. А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1977. 392 с.
11. Б. П. Байков [и др.] Дизели: справочник. Л.: Машиностроение, 1977. 497 с.
12. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. и др. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направление подготовки «Энергомашиностроение» М.: Машиностроение, 2011. 496 с.

13. Костин, А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справочник. Л.: Машиностроение, 1979. 222 с.

References

1. Vas'kevich F. A. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii glavnykh sudovykh dizeley metodami regulirovaniya i diagnostiki toplivnoy apparatury*. SPB: 2009. 267 p.
2. Ivanov L. A. *Teplonapryazhennost' i ekspluatatsionnaya nadezhnost' tsilindro-porshnevoy gruppy sudovogo dizel'ya: prakticheskoe posobie*. Murmansk: Murman. kn. izd-vo, 1974. 208 p.
3. Lyshevskiy A. S. *Raspylivanie topliva v sudovykh dizelyakh*. L.: Sudostroenie, 1974. 284 p.
4. Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy: uchebnyk dlya vuzov*. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2008. 720 p.
5. Sviridov Yu.B. *Smeseobrazovanie i sgoranie v dizelyakh*. L.: Mashinostroenie, 1972. 224 p.
6. D'yachenko N.Kh., Kostin A.K. i dr. *Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya* / pod red. D'yachenko. L.: Mashinostroenie, 1974. 552 p.
7. Odintsov V.I., Odintsov V.B., Sviridyuk N.V. *Metod modelirovaniya nestatsionarnogo raspredeleniya temperatur v tsilindrakh dizeley rybpromyslovogo flota* // «Izvestiya» BGARF FGBOU «KGTU». 2016. T. 37. № 3. 150 p.
8. Odintsov V. I. *Rabochiy protsess sudovykh DVS: monografiya*. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2010. 140 p.
9. Vibe I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigateley*. M.: Mashinostroenie, 1962. 300 p.
10. Vansheydt V. A. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. L.: Sudostroenie, 1977. 392 p.
11. B. P. Baykov [i dr.] *Dizeli: spravochnik*. L. : Mashinostroenie, 1977. 497 p.
12. Chaynov N.D., Ivashchenko N.A. i dr. *Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya. Uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti «Dvigateli vnutrennego sgoraniya» napravleniye podgotovki «Energomashinostroenie»* M.: Mashinostroenie, 2011. 496 p.
13. Kostin, A. K. *Teplonapryazhennost' dvigateley vnutrennego sgoraniya: spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1979. 222

УДК 621.436

ПОСТРОЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ С НАДДУВОМ

Леонид Игнатьевич Ковальчук

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт и сервис автомобилей»

«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Марина Васильевна Исаева

аспирант кафедры судовых энергетических установок
«Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Аннотация

Целью настоящего исследования является построение инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования узлов и систем главных судовых дизелей, позволяющих реализовать процесс диагностирования без его привязки к заданному режиму или режимам определенной характеристики. Система технического диагностирования судового дизеля может быть построена как многоканальная, то есть состоящая из отдельных локальных систем, охватывающих наиболее важные узлы и системы двигателя. Одним из таких объектов диагностирования является воздушный тракт дизеля с наддувом, поскольку его функционирование оказывает существенное влияние на качество протекания рабочих процессов в цилиндрах и тепловое состояние деталей, ограничивающих камеру сгорания.

В статье излагается метод построения инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования воздушного тракта судовых дизелей с наддувом. Приведены примеры построения моделей для функционального диагностирования объектов воздушного тракта конкретного дизеля и результаты их практического апробирования.

Ключевые слова: судовой дизель, воздушный тракт, экспериментально-теоретические модели, функциональное диагностирование.

DEVELOPMENT OF INVARIANT EXPERIMENTAL-THEORETICAL MODELS FOR FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF AIR PATH OF SHIP FORCED-INDUCTION DIESEL ENGINES

Leonid Kovalchuk

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Automobile Transport and Automotive Service"

Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, Molodeznaya str., 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Marina Isaeva

Post-graduate student of the Department of Ship Power Plants
Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University
236029, Kaliningrad, Molodeznaya str., 6
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Abstract

The purpose of this study is to develop invariant experimental theoretical models for the functional diagnosis of components and systems of main marine diesels which allow to carry out the diagnostic process without connecting it to a specific modes or to the ones of a certain characteristic. The system of technical diagnosis of the ship's diesel engine can be developed as

a multi-channel system that consists of separate local systems covering the most important units and engine systems. One of these objects of diagnosis is the air path of the supercharged diesel engine, since its functioning has a significant effect on the quality of the flow of working processes in the cylinders and the thermal state of the parts that limit the combustion chamber.

The article describes a method for development of invariant experimental theoretical models for the functional diagnosis of the air path of marine supercharged diesel engines. The examples of development models for the functional diagnosis of air-path components of a particular diesel engine and the results of their practical testing are presented.

Key words: ship diesel, air path, experimental-theoretical models, functional diagnostics.

Введение

По современным представлениям повышение эффективности использования судовых дизелей в значительной степени может быть достигнуто с помощью методов и средств функциональной диагностики, позволяющих своевременно выявлять и локализовать возникшие неисправности в объектах диагностирования на ранней стадии их проявления.

Следует отметить, что независимо от физической природы метода функционального диагностирования, методической основой распознавания технического состояния двигателей всех типов и назначений, во всех системах технического диагностирования является единый принцип: сравнения текущих значений диагностических параметров с их эталонными значениями. Причем эталонные значения диагностических параметров должны соответствовать техническому состоянию двигателя, которое принято за исходное.

Названный принцип может быть реализован без каких – либо допущений только в том случае, когда потребитель энергии имеет стабильную во времени характеристику. Статистические данные о фактических режимах работы главных судовых дизелей свидетельствуют о том, что характеристики гребных винтов являются неустойчивыми во времени и их протекание определяется условиями плавания. [1]

1. Теоретические предпосылки и алгоритм построения моделей

Рассмотрим теоретические предпосылки и алгоритм построения моделей, позволяющих контролировать качество функционирования компонентов воздушного тракта дизелей с наддувом в судовых условиях.

Совокупность свойств, заложенных в конструкцию двигателя в процессе проектирования и определяющих его способность с заданным качеством вырабатывать механическую энергию, будем характеризовать полем режимов допустимых для длительной эксплуатации. Под упомянутым полем понимается часть координатной плоскости $N_e = f(n)$ (эффективная мощность – частота вращения), ограниченная слева и справа вертикалями $n_{\min} = const$ и $n_{\max} = const$; сверху – верхней ограничительной характеристикой; снизу – координатной осью n .

Очевидно, что ограниченное таким способом поле включает всю совокупность режимов, определяющих условия функционирования всех компонентов воздушного тракта дизелей с наддувом.

Положение границ описанного поля определяются только свойствами двигателя и не зависит от особенностей потребителя механической энергии, то есть оно обладает свойством инвариантности относительно возможных режимов работы двигателя. Следовательно, для оценки условий функционирования компонентов воздушного тракта в исходном состоянии (заведомо исправный двигатель), на основе информативных параметров необходимо сформировать количественную структуру, которая во всех точках поля давала бы постоянное численное значение, то есть обладала свойством инвариантности относительно возможных возмущений со стороны потребителя механической энергии.

Положим, что в описанном поле контролируются параметры $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ рабочих процессов, протекающих в объектах воздушного тракта, подлежащих диагностированию. Построим такую комбинацию этих параметров, которая во всех точках поля имела бы постоянное численное значение

$$f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n; x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \quad (1)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - определяемые параметры.

В такой постановке задача сводится к установлению явного вида уравнения, выражающего взаимосвязи между информативными параметрами в поле возможных режимов работы двигателя. Поскольку эти взаимосвязи обусловлены физической сущностью процессов, протекающих в воздушном тракте дизеля с наддувом, то в общем случае они могут быть выражены разнообразными зависимостями.

Анализ экспериментальных закономерностей изменения информативных параметров в поле возможных режимов работы судовых дизелей показывает, что наиболее подходящими исходными данными для формирования инвариантных количественных структур типа (1) являются результаты стендовых испытаний нового двигателя по серии нагрузочных характеристик. При наличии таких данных расчет параметров инвариант-

ной модели производится по алгоритму подробно описанному в работах [3,4].

Практическую реализацию алгоритма, применительно к определению параметров инвариантных экспериментально-теоретических моделей для функционального диагностирования компонентов воздушного тракта судовых дизелей с наддувом, покажем на конкретном примере.

В качестве исходной информации используем результаты стендовых испытаний двигателя 6ЧН25/34-3 по серии нагрузочных характеристик (см. рис.1). Для функционального диагностирования компрессора построим модель на основе следующих информативных параметров: S_x - положение указателя нагрузки; n - частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; P_e - давление наддувочного воздуха на выходе из компрессора, бар.

В последующих расчетах будем использовать безразмерные значения информативных параметров:

$$S_{xo} = \frac{S_x}{S_{xH}}; n_o = \frac{n}{n_H}; P_{eo} = \frac{P_e}{P_{eH}}. \quad (2)$$

где принято $S_{xH}=4,9$; $P_{eH}=0,57$, бар;
 $n_H=500$, мин^{-1} .

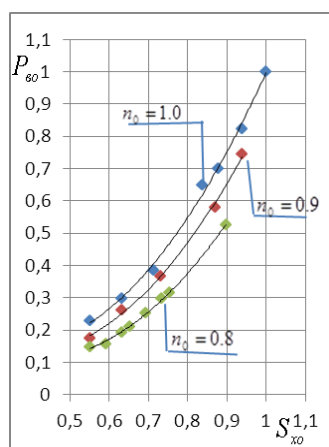


Рис. 1. Зависимости $P_{eo} = f(S_{xo})$ двигателя 6ЧН25/34-3 при фиксированном значении частот вращения $n_o = 1,0; 0,9; 0,8$.

На рис. 1 дано графическое представление зависимостей $P_{eo} = f(S_{xo})$ по трем нагрузочным характеристикам. Видно, что это нелинейные зависимости. Поэтому каждая из них может быть аппроксимирована полиномом второго порядка вида:

$$x_1(n_0) + x_2(n_0) \cdot S_{xo} + x_3(n_0) \cdot S_{xo}^2 = P_{eo}, \quad (3)$$

где S_{xo} и P_{eo} - относительное значение входного в диагностируемый объект параметра и выходного из объекта параметра;

$x_1(n_0)$, $x_2(n_0)$, $x_3(n_0)$ - определяемые параметры в функции от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Система полиномов аппроксимирующих нагрузочных характеристики в явном виде будет следующей:

$$P_{eo} = 2.0822 \cdot S_{xo}^2 - 1.5029 \cdot S_{xo} + 0.4185;$$

$$P_{eo} = 1.9593 \cdot S_{xo}^2 - 1.4938 \cdot S_{xo} + 0.4113;$$

$$(4) P_{eo} = 1.7583 \cdot S_{xo}^2 - 1.4396 \cdot S_{xo} + 0.4021.$$

Система полиномов (4) позволяет выявить закономерности изменения определяемых параметров $x_i = f(n_0)$ при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой.

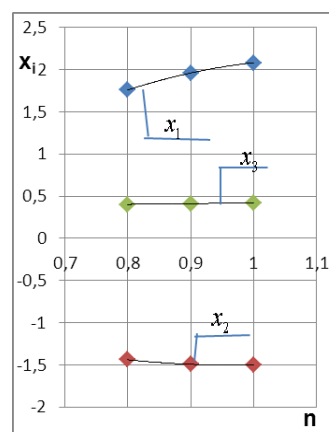


Рис. 2. Зависимости определяемых параметров от относительной частоты вращения коленчатого вала $x_i = f(n_0)$

Графическое представление зависимостей $x_i = f(n_0)$ показывает (см. рис. 2), что данные зависимости имеют нелинейный характер, поэтому аппроксимированы полиномами второго порядка:

$$x_1 = -3.905 \cdot n^2 + 8.6485 \cdot n - 2.6613;$$

$$x_2 = 2.205 \cdot n^2 - 4.2905 \cdot n + 0.5816; \quad (5)$$

$$x_3 = -0.1 \cdot n^2 + 0.262 \cdot n + 0.2565.$$

Подстановкой (5) в (3) получим уравнение поверхности образованной последовательным смещением зависимости $P_{eo} = f(S_{xo})$ при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой.

$$P_{\text{го}} = (-3.905 \cdot n^2 + 8.6485 \cdot n - 2.6613) \cdot S_{\text{хо}}^2 + \\ + (2.205 \cdot n^2 - 4.2905 \cdot n + 0.5816) \cdot S_{\text{хо}} + \\ + (-0.1 \cdot n^2 + 0.262 \cdot n + 0.2565). \quad (6)$$

По средствам представления $P_{\text{гоэ}} = f(P_{\text{гор}})$ поверхность образованная последовательным смещением зависимости $P_{\text{го}} = f(S_{\text{хо}})$ преобразуется в прямую - эталон, который совместно с моделью используются для функционального диагностирования компрессора в произвольный период эксплуатации. Диагностирование производится по нижеследующему алгоритму:

1. Регистрируются значения информативных параметров $P_{\text{го}}$, n , $S_{\text{хо}}$ на четырех, пяти режимах принадлежащих области принятой за эталон.
2. Осуществляется переход к безразмерным параметрам по соотношениям вида (2).
3. По уравнению определяются расчетные значения давления наддувочного воздуха за компрессором.
4. Строится зависимость $P_{\text{гоэ}} = f(P_{\text{гор}})$, соответствующая фактическому состоянию проточных частей компрессора.
5. С учетом реального отклонения построенной зависимости от эталона делается заключение о качестве функционирования компрессора.

Результаты практического апробирования модели (6) приведены на рис.3. Они свидетельствуют о том, что посредством только модели (6) возможно неисправности воздушной части тракта

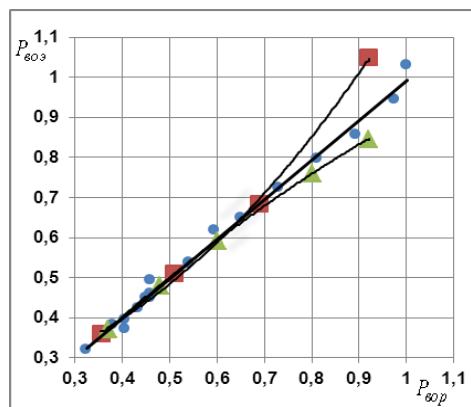


Рис.3. Результаты практического апробирования модели (6)

- - снижена термическая эффективность охладителя наддувочного воздуха
- ▲ - уменьшено проходное сечение воздушного фильтра

классифицировать по направлению отклонения. Если замеренные значения $P_{\text{гоэ}}$ оказываются больше расчётных $P_{\text{гор}}$, то это свидетельствует о проявлении неисправностей в элементах расположенных за компрессором. Смещение реально построенных зависимостей $P_{\text{гоэ}} = f(P_{\text{гор}})$ вниз от эталона свидетельствует о том, что неисправность проявляется в элементах расположенных до компрессора или в проточной части компрессора.

По существу, изложенным и ограничиваются диагностические возможности модели (6). Для повышения уровня конкретности диагноза возможно по описанному алгоритму построить модели, предназначенные для оценки качества функционирования конкретных частей воздушного тракта (например: для оценки качества функционирования охладителя наддувочного воздуха и технического состояния воздушного фильтра).

Заключение

1. Модели для функционального диагностирования компонентов воздушного тракта сохраняют свойство инвариантности в пределах той области, которая принимается за эталон.
2. Инвариантные модели имеют практическую значимость только в том случае, если они построены на основе информативных параметров доступных для оперативного контроля в судовых условиях.

Литература

1. Карпов Л.Н., Лютов И.Л., Гаврилов В.С. Двигатели с турбонаддувом М.: Транспорт, 1971. 280 с.
2. Межеицкий А.Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей. Ленинград: Судостроение, 1971. 192 с.

3. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Теоретические предпосылки и алгоритм формирования моделей для контроля режимов ограничительных по тепловой напряженности характеристик судовых дизелей // Судостроение. 2015. Т.812. № 4. С. 29-32.

4. Ковальчук Л.И., Исаева М.В. Экспериментально - теоретические модели для диагностирования рабочих процессов в цилиндрах судовых дизелей // Двигателестроение. 2015. Т.262. № 4. 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. Т. 80. №3. С. 61-69.

References

1. Karpov L.N., Lyutov I.L., Gavrilov V.S. Dvigateli s turbonadduvom. M.: Transport, 1971. 280 p.

2. Mezheritskiy A.D. Turbokompressory sudovykh dizeley. Leningrad: Sudostroenie, 1971. 192 p.

3. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V. Teoreticheskie predposylki i algoritm formirovaniya modeley dlya kontrolya rezhimov ogranichitel'nykh po teplovoy napryazhennosti kharakteristik sudovykh dizeley. Sudostroenie. 2015. T.812. № 4. Pp. 29-32.

4. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V. Eksperimental'no - teoreticheskie modeli dlya diagnostirovaniya rabochikh protsessov v tsilindrakh sudovykh dizeley. Dvigatelsestroenie. 2015. T.262. № 4. Pp.30-33.

5. Koval'chuk L.I., Isaeva M.V. Algoritm rascheta ogranichitel'noy po teplovoy napryazhennosti kharakteristiki sudovykh dizeley na osnove rezul'tatov stendovykh ispytaniy. Eksploatatsiya morskogo transporta. 2016. T. 80. №3. Pp. 61-69.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89, 614.841.4, 627.212

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННО-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@klgtu.ru

Аннотация

В статье рассмотрена актуальная задача совершенствования принятия управленческих решений руководителем тушения пожара в морских портах в условиях неопределенности. В статье предложено разработать систему, реализующую информационное и аналитическое обеспечение деятельности руководителя тушения пожара в морских портах и основанной на применении элементов искусственного интеллекта – нейро-нечетких сетей, для повышения эффективности управленческой деятельности руководителя в сложных условиях. В работе рассмотрены особенности построения функциональной структуры системы в качестве начального этапа построения системы поддержки принятия решений руководителем при локализации и ликвидации пожаров. Выполнено построение следующих функциональных моделей системы: контекстная диаграмма IDEF0 верхнего уровня (диаграмма A-0) «Выполнять руководство тушением пожара»; дочерняя диаграмма IDEF0 (диаграмма A0) «Выполнять руководство тушением пожара»; дочерняя диаграмма IDEF0 первого уровня (диаграмма A1) «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара». Создана функциональная модель процесса принятия управленческих решений руководителем тушения пожара с учетом внедрения системы.

Ключевые слова: пожар, нейро-нечеткие сети, тушение пожара, руководитель тушения пожара, функциональная модель, диаграмма IDEF0.

FUNCTIONAL MODELING OF THE INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT SYSTEM FOR FIRE FIGHTING PROCESS MANAGEMENT AT SEAPORTS**Tatiana Stankevich**

cand.sci.tech.

associate professor of the Department of Protection in Emergency Situations

Kaliningrad State Technical University

1 Sovietsky prospect, Kaliningrad 236022 Russian Federation

E-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru

Abstract

The paper considers the relevant issue of improving the process of taking decisions by the manager of fire fighting at the seaports under uncertainty. The author proposes to develop the system that provides information and analytical support for the activity of fire fighting management staff at the seaports and is based on the application of elements of artificial intelligence – neuro-fuzzy networks. Application of the developed system for fire fighting management staff makes it possible to increase efficiency of managerial decision-making process under complex circumstances. The paper considers the features of creating the functional structure of the system as an initial stage in making the decision-making process support system for fire fighting management staff. The author develops the following functional models of this system: IDEF0 top level context diagram (diagram A-0) "To carry out management of fire fighting process"; IDEF0 child diagram (diagram A0) "To carry out management of fire fighting process"; IDEF0 first-level child diagram (diagram A1) "To calculate the number of base and potential resources". The functional model of the managerial decision-making process (carried out by a fire fighting manager) which takes into account the implementation of the system has been developed.

Key words: fire, neuro-fuzzy networks, fire extinguishing, manager of fire extinguishing, functional model, IDEF0 Diagram.

Введение

В соответствии с [1] принято выделять три типа ситуаций принятия управленческих решений в зависимости от наличия случайных и неопределенных факторов, оказывающих влияние на исход реализации альтернативы: при определенности; при риске; при неопределенности. Согласно [2] задача управления процессом локализации и ликвидации пожаров в морских портах относится к задачам принятия решений руководителем тушения пожара при неопределенности, поскольку невозможно сформулировать явным образом законы функционирования сложного объекта – пожара по причине ограниченной исследованности и сложности.

Результаты анализа возможностей программ для руководителя тушения пожара, изложенные в [2], позволили выявить практическую ограниченность использования данных средств для оперативной поддержки работы руководителя при неопределенности. Применяемые в рассматриваемых программных средствах классические алгоритмические методы и модели теории принятия решений малоэффективны и не дают высокоточных и оперативных результатов при неопределенности.

С целью снятия неопределенности произведен анализ наиболее распространенных средств уменьшения степени неопределенности, подробно изложенный в [2]. На основании результатов анализа установлена предпочтительность применения элементов искусственного интеллекта – нейро-нечетких сетей (ANIS [3] и NEFCLASS [4, 5]) для решения управленческих задач при дефиците времени и неопределенности.

С учетом вышеизложенного определена необходимость модификации существующего подхода организации тактики тушения пожаров в морских портах путем реализации системы информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе нейро-нечетких сетей.

Начальным этапом разработки предложенной системы является построение ее функциональной структуры.

1. Цель и задачи исследования

Цель исследования – описание особенностей функциональной структуры системы информаци-

онно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе нейро-нечетких сетей. Для достижения поставленной цели необходимо: построить функциональные модели системы; построить функциональную модель процесса принятия управленческих решений с учетом внедрения системы.

2. Построение функциональных моделей системы

В ходе описания особенностей функциональной структуры системы, реализующей информационное и аналитическое обеспечение деятельности руководителя, необходимо отразить основные элементы системы, ее функции и потоки информации, связывающие эти функции.

Для решения поставленной задачи выполнено построение функциональных моделей системы в виде диаграммы IDEF0 в соответствии с требованиями, изложенными в [3]: на рисунке 1 – контекстная диаграмма верхнего уровня (диаграмма A-0) «Выполнять руководство тушением пожара»; на рисунке 2 – дочерняя диаграмма (диаграмма A0) «Выполнять руководство тушением пожара»; на рисунке 3 – дочерняя диаграмма первого уровня (диаграмма A1) «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара».

На рисунках 1 – 3 использованы обозначения: *PM* – параметры для построения нейро-нечеткой модели; *PS* – параметры для прогнозирования площади пожара; *PR* – параметры для выбора ранга пожара; *PP* – параметры для выбора оптимального плана мероприятий по тушению пожара; *PA* – параметры для оценки успешности реализации плана мероприятий по тушению пожара; *PQ* – параметры для оценки достаточности ресурсов для тушения пожара; *PK* – параметры для выбора ресурсов для тушения пожара; *R* – ранг пожара; *S* – площадь пожара в здании, м²; *M* – нейро-нечеткая модель; *Q* – оценка достаточности ресурсов; *W* – оптимальный план действий; *V* – оценка успешности реализации плана; *P* – выбор ресурсов; *SR* – площадь помещения, где произошел пожар, м²; *EI* – предел огнестойкости строительных конструкций, мин; *H* – линейная скорость распространения горения, м/мин; *TF* – время развития пожара, мин.

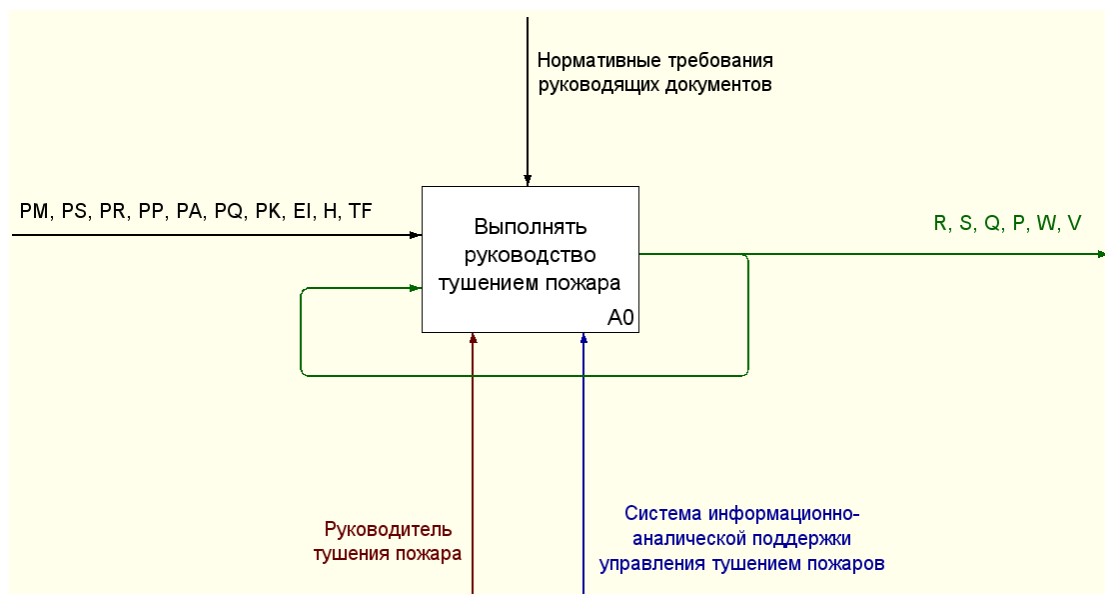


Рис. 1. Диаграмма A-0 «Выполнять руководство тушением пожара»

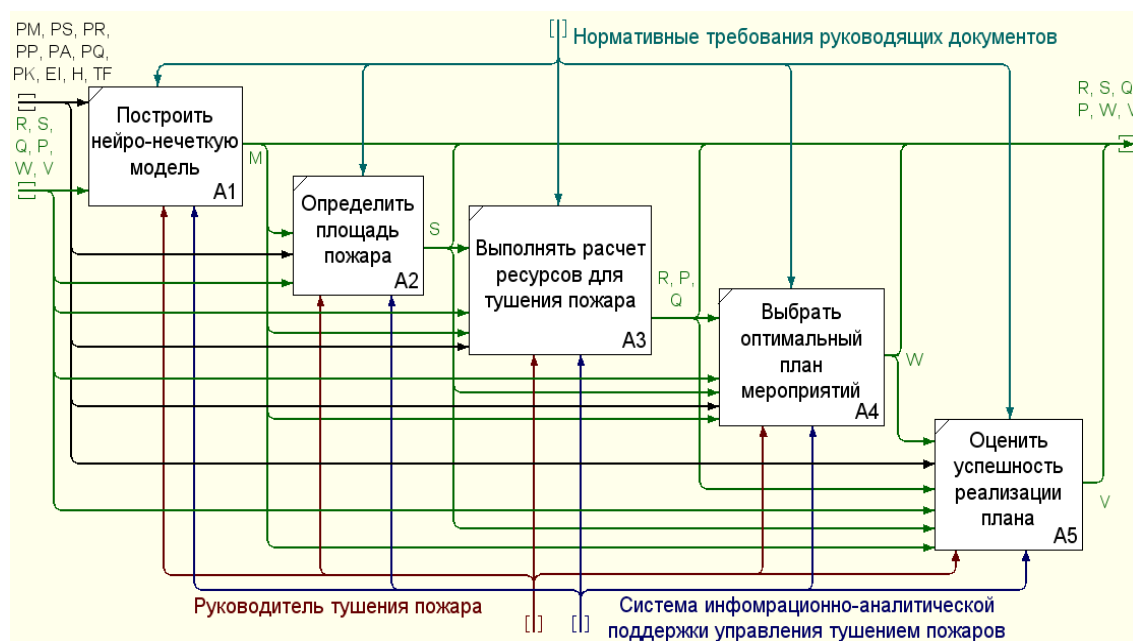


Рис. 2. Диаграмма A0 «Выполнять руководство тушением пожара»

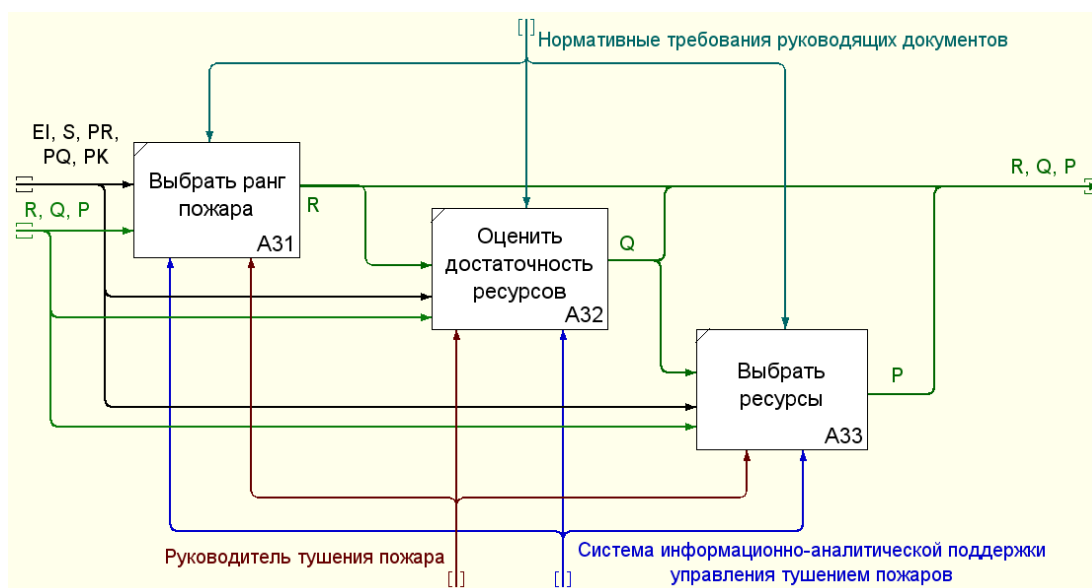


Рис. 3. Диаграмма А1 «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара»

Параметры для построения нейро-нечеткой модели PM включают в себя: $X_k = \{x_i^k\}$ – k -й входной вектор параметров; $X_i^j = \{x_i^j\}$ – объекты, подлежащие кластеризации, где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$, $\alpha, \beta > 0$ – положительные коэффициенты кластеризации, P_0 – пороговое значение для кластеризации; TR – параметры настройки модели (гибридный метод оптимизации; требуемая точность обучения – 0; количество итераций обучения – 400); OP – начальные параметры оптимизации (максимальное число итераций алгоритма – 100; минимальный шаг по каждой из искомым переменных – 0,0000005; максимальный шаг по каждой из искомым переменных – 0,1).

Параметры для прогнозирования площади пожара PS : τ_1 – время с момента возникновения пожара до сообщения в пожарную охрану, мин; τ_2 – время боевого развертывания, мин; τ_3 – время с момента возникновения пожара до его локализации, мин; F – форма пожара (круг, прямоугольник); a_h – ширина площади пожара (здания, помещения), м; n – число направлений развития пожара; k – коэффициент, учитывающий величину угла, в направлении которого происходит распространение пламени.

Параметры для оценки успешности реализации плана мероприятий по тушению пожара PA включают в себя: D – количество погибших, чел; A – количество пострадавших, чел; C – фактический расход огнетушащих веществ, л/с.

Параметры для оценки достаточности ресурсов, привлекаемых для тушения пожара, PQ : Q_1 – имеющийся объем ресурсов для тушения пожара на объекте, ед.

Параметры, необходимые для выбора ранга пожара PR : F – этаж, на котором произошел пожар, этаж; NP – количество людей на объекте, чел.

Параметры для выбора оптимального плана мероприятий по тушению пожара PP : G_1 – участок тушения, ед; G_2 – пожарный рукав, шт; G_3 – требуемый расход огнетушащих веществ, л/с; μ – степени принадлежности элементов нечетким множествам; α_{ij} – преимущество альтернативы X_i перед проектом X_j ($i, j = \overline{1, k}$) по шкале Сатаи; α_z – коэффициент относительной важности критерия G_z .

Параметры для выбора ресурсов, привлекаемых для тушения пожаров, PK : d_1 – тип привлекаемых ресурсов (базовые, потенциальные или базовые и потенциальные).

Как видно из рисунков 1 – 3, функциональная модель разработанной системы состоит из комплекса блоков, реализующих функции построения нейро-нечетких моделей, решения о ранге пожара, решения о площади пожара, решения об оценке достаточности ресурсов, решения о выборе ресурсов, решения о выборе оптимального плана мероприятий, решения об оценке успешности реализации плана мероприятий.

Основой для формирования предложений по локализации и ликвидации пожара являются две диаграммы: диаграмма А1 «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара»; диаграмма А0 «Выполнять руководство тушением пожара».

Ключевыми элементами диаграммы А1 являются три модуля: модуль А31 «Выбрать ранг пожара» (входные параметры – EI, S, PR ; выходной параметр – R); модуль А32 «Оце-

нить достаточность ресурсов» (входные параметры – R , PQ ; выходной параметр – Q); модуль A33 «Выбрать ресурсы» (входные параметры – PK ; выходной параметр – P).

Полученные результаты используются для обеспечения работы блока A4 «Выбрать оптимальный план мероприятий» и блока A5 «Оценить успешность реализации плана» диаграммы A0.

Ключевыми элементами диаграммы A0 являются пять модулей: модуль A1 «Построить нейро-нечеткую модель» (входные параметры – PM ; выходной параметр – M); модуль A2 «Определить площадь пожара» (входные параметры – PS , SR , EI , H , TF ; выходной параметр – S); модуль A3 «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара» (входные параметры – ; выходные параметры – R , Q , P); A4 модуль «Выбрать оптимальный план мероприятий» (входные параметры – SR , EI , H , TF , R , S , PP ; выходной параметр – W); модуль A5 «Оценить успешность реализации

плана» (входные параметры – PA , R , S , TF ; выходной параметр – V).

Таким образом, выполнено построение функциональных моделей системы, предназначенной для информационного и аналитического обеспечения при локализации и ликвидации пожаров: диаграммы A-0 «Выполнять руководство тушением пожара»; диаграммы A0 «Выполнять руководство тушением пожара»; диаграммы A1 «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара».

3. Построение функциональной модели процесса принятия управленческих решений руководителем тушения пожара

На базе полученных результатов построения функциональных моделей системы создана функциональная модель процесса принятия управленческих решений руководителем с учетом внедрения системы. Данная модель функциональная модель в виде контекстной диаграммы IDEF0 изображена на рисунке 4.

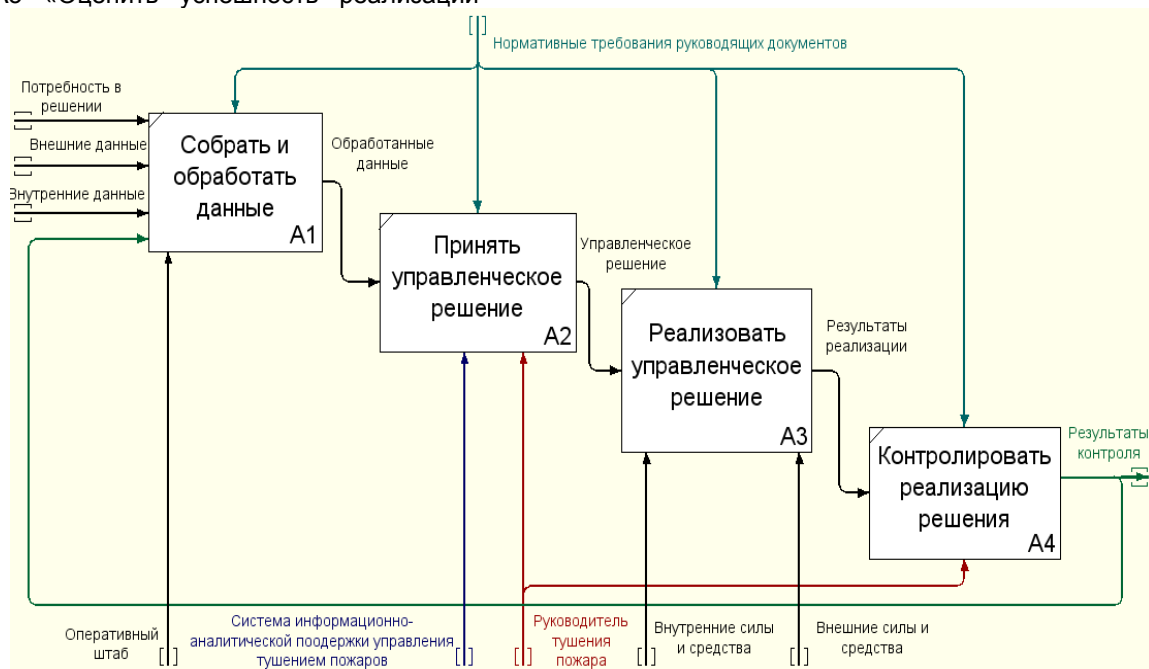


Рис. 4. Предложенная функциональная модель процесса принятия управленческих решений руководителем тушения пожара морского порта

Как видно из рисунка 4, в блоке A2 «Принять управленческое решение» в качестве дополнительного механизма, посредством которого выполняется процесс принятия управленческого решения руководителем, предложено применение предложенной системы, использующей математический аппарат нейро-нечетких сетей, совместно с основным механизмом – руководителем тушения пожара.

Предложенная система, предназначенная для информационного и аналитического обеспечения действий руководителя в условиях неопределенности, позволит повысить эффективность управленческих решений руководителей в процессе

локализации и ликвидации пожара в морском порту (что наглядно демонстрируют результаты из [2]). Это позволяет, следовательно, повысить уровень: безопасности работающего персонала; бесперебойной работы применяемого технологического оборудования; сохранности материальных средств; экологической безопасности окружающей среды от воздействия опасных факторов пожара на территории порта.

Таким образом, построена функциональная модель процесса принятия управленческих решений руководителем с учетом внедрения системы, реализующей информационное и аналитическое обеспечение деятельности руководителя в

морских портах и основанной на применении

элементов искусственного интеллекта.

Заключение

1. Для решения слабо формализуемой управленческой задачи тушения пожара в морских портах при дефиците времени и неопределенности с высокой эффективностью предложено разработать и внедрить систему информационно-аналитической поддержки управления при тушении пожаров на базе нейро-нечетких сетей. Использование нейро-нечетких сетей позволяет системе использовать опыт экспертов, обучаться в процессе функционирования и функционировать в условиях неопределенности.

2. В работе описана функциональная структура системы посредством построения ее функциональных моделей в виде диаграмм IDEF0: диаграммы A-0 «Выполнять руководство тушением пожара»; диаграмма A0 «Выполнять руководство тушением пожара»;

диаграммы A1 «Выполнять расчет ресурсов для тушения пожара».

3. Выполнено построение функциональной модели процесса принятия управленческих решений руководителем с учетом внедрения предложенной системы поддержки деятельности руководителя тушения пожара.

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. Капыш А.С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений на основе рассуждений по прецедентам: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01: защищена: 7.07.11 / Капыш Александр Сергеевич. Волгоград, 2011. 238 с.
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. Методология функционального моделирования: Р 50.1.028-2001: утв. постановлением Госстандарта России от 2 июля 2001 г. №256-ст: введ. в действие 01.07.2002. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 75 с.
4. Nauck D., Klawonn F., & Kruse R. Foundations of Neuro-Fuzzy Systems. John Wiley & Sons, 1997. 305 p.
5. Nauck D. & Kruse R. NEFCLASS – A neuro-fuzzy approach for the classification of data. Applied Computing, 1995. pp. 1-5.
6. Kruse R., Gebhard J., & Klawonn F. Foundation of Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons Inc., 1994. 407 p.

References

1. Kapysh A.S. Intellektual'naya sistema podderzhki prinyatiya resheniy na osnove rassuzhdeniy po pretsedentam: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01: zashchishchena: 7.07.11. Kapysh Aleksandr Sergeevich. Volgograd, 2011. 238 p.
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. Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya: R 50.1.028-2001: utv. postanovleniem Gosstandarta Rossii ot 2 iyulya 2001 g. №256-st: vvod. v deystvie 01.07.2002. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000. 75 p.
4. Nauck D., Klawonn F., & Kruse R. Foundations of Neuro-Fuzzy Systems. John Wiley & Sons, 1997. 305 p.
5. Nauck D. & Kruse R. (1995). NEFCLASS – A neuro-fuzzy approach for the classification of data. Applied Computing, 1-5.
6. Kruse R., Gebhard J., & Klawonn F. Foundation of Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons Inc., 1994. 407 p.

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 639.2.081

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ МОРСКИХ КАТАСТРОФ НА ОСНОВЕ КОНКУРИРУЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**Виталий Александрович Бондарев**

доктор технических наук, доцент, декан судоводительского факультета,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
236035, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: dekanat_swf@bga.gazinter.net

Владимир Алексеевич Волкогон

кандидат экономических наук, доцент, ректор университета,
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: rector@klgtu.ru

Юрий Иванович Нечаев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры кораблестроения,
Калининградский государственный технический университет
236029, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: dekanat_swf@bga.gazinter.net

Аннотация

Обсуждается структура и функциональные элементы центра экстренных вычислений при оперативном контроле морских катастроф судов промыслового флота на основе интеграции интеллектуальных систем новых поколений и высокопроизводительных вычислений в проблемно-ориентированной динамической среде виртуального полигона. Функционирование компьютерного центра в режиме реального времени обеспечивается системной интеграцией информационного, алгоритмического и программного обеспечения на базе данных динамических измерений и структурированной базы знаний. Основное внимание уделяется обеспечению поддержки принятия решений в сложных динамических средах с использованием современной теории катастроф.

Рассмотренные концептуальные решения реализуют стратегию динамической теории катастроф, определяющую эволюцию судна в условиях непрерывного изменения поведения объекта и внешней среды. Управление процессом взаимодействия, обеспечивается уровнями функционирования структурных компонент центра экстренных вычислений с использованием диалоговой системы управления, обеспечивающей анализ состояний контролируемого судна, выработку управленческих решений и их реализации, на основе проблемно-ориентированной бортовой интеллектуальной системы.

Ключевые слова: принцип конкуренции, экстренные вычисления, режим реального времени, динамическая теория катастроф.

OPERATIONAL CONTROL OF MARINE CATASTROPHES ON THE BASIS OF COMPETITIVE COMPUTING TECHNOLOGIES**Vitaly Bondarev**

Doctor of technical sciences, associate professor, dean of the navigational faculty,
Baltic Fisheries Fleet State Academy
Molodezhnaya, 6 Kaliningrad 236035, Russian Federation
e-mail: dekanat_swf@bga.gazinter.net

Vladimir Volkogon

Candidate of economic sciences, associate professor, rector of the university,
Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: rector@klgtu.ru

Yury Nechaev

Doctor of technical sciences, professor, professor of department of shipbuilding,

Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: dekanat_swf@bga.gazinter.net

Abstract

The structure and functional elements of the center for emergency calculations while carrying out operational control of marine disasters of fishing vessels are discussed on the basis of integration of intelligent systems of new generations and high-performance computing in the problem-oriented dynamic environment of a virtual testing range. The functioning of the computer center in real time mode is provided by system integration of information, algorithmic and software support based on dynamic measurements and a structured knowledge base. The main focus is on providing support for decision-making in complex dynamic environments using modern disaster theory.

The considered conceptual solutions realize the strategy of the dynamic theory of catastrophes, which determines the evolution of the vessel under the conditions of a continuous change in the behavior of the object and the external environment. The management of the interaction process is ensured by the levels of functioning of the structural components of the center for emergency calculations using an interactive control system that provides analysis of the state of the controlled vessel, the development of management decisions and their implementation based on the problem-oriented on-board intelligent system.

Key words: the principle of competition, emergency calculations, real-time mode, the dynamic theory of catastrophes.

1. Интегрированная среда контроля чрезвычайных ситуаций

Цель экспериментальных исследований, проводимых при разработке центра экстренных вычислений (ЦЭВ), связана с изучением особенностей взаимодействия судна с внешней средой в чрезвычайных ситуациях (рис.1) на основе бортовой интеллектуальной системы (ИС) нового поколения, функционирующей в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [17].

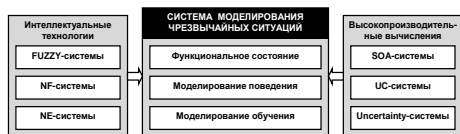


Рис.1. Парадигма обработки информации при моделировании чрезвычайных ситуаций

Интегрированная среда ИС организована в рамках концептуальных решений на основе динамической теории катастроф [6] и характеризуется взаимодействием функциональных компонент: нечетких (FUZZY), нейронечетких (NF) и нейроэволюционных (NE) систем. Проблема режима реального времени обеспечивается с помощью сервисно-ориентированной архитектуры [13], [14] в режиме UC, а проблема неопределенности – в рамках концепции минимальной длины описания (Minimal Decision Length (MDL)) [4] и теории сложности [10]. В практике эксплуатации возможны ситуации, когда вследствие неопределенности (uncertainty) интересующие характеристики судна недоступны для непосредственного наблюдения и измерения, в то же время данные физического эксперимента могут быть достаточно сложны и связаны с большими финансовыми затратами. В этом случае приобретает некоторая косвенная информация о динамике взаимо-

действия на основе интерпретации результатов вычислительного эксперимента [6] – [8]. Таким образом, в бортовой ИС и интегрированном комплексе ЦЭВ рассматриваются задачи, в которых требуется определить причины, по полученным в результате измерениям следствиям. Задачи такого типа принято называть обратными [11]. Причинно-следственные обратные задачи индивидуальны и используются при построении математических моделей взаимодействия на базе динамической теории катастроф [6].

2. Методы и модели при интерпретации чрезвычайных ситуаций

Процедура решения задач, состоящих в обращении причинно-следственных связей, часто связана с преодолением серьезных математических трудностей. Успех решения сильно зависит как от качества и количества полученной из эксперимента информации, так и от способа ее обработки [2]. Именно поэтому динамическая теория катастроф предусматривает создание мультимодельного программного комплекса (МПК), использующего геометрическую и аналитическую интерпретацию поведения судна в чрезвычайных ситуациях. На основе такого представления решение ведется в рамках процедур Soft Computing [17] и Data Mining [1] с помощью математических моделей, построенных на базе модифицированных дифференциальных уравнений Матье и Дuffинга [6]. При этом решению обратной задачи предшествует исследование свойств прямой задачи на основе формального концептуального анализа [16]. Предполагается, что исходные данные обладают большими размерностями (множество факторов и состояний судна), не всегда подчиняются нормальному распределению, являются неполными, неточными и зашумленными. Считается, что в нестандартных ситуациях в условиях значительной неопределенности исходные

данные чрезвычайно сложно установить в результате специально организованного физического моделирования и единственным способом их получения информации является вычислительный эксперимент. Приведенная характеристика исходных данных позволяет сформулировать следующие основные требования к математической модели взаимодействия функциональных элементов ЦЭВ:

- содержательная интерпретируемость с использованием концепции Soft Computing и Data Mining на основе геометрической и аналитической компонент динамической модели катастроф [6];
- эффективная вычислимость на основе алгоритмов параллельной обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде [6] – [8].

Именно эти два требования определяют построение модели взаимодействия при разработке информационной среды и алгоритмов контроля чрезвычайных ситуаций, а также тестирования базы знаний ИС (рис.2).

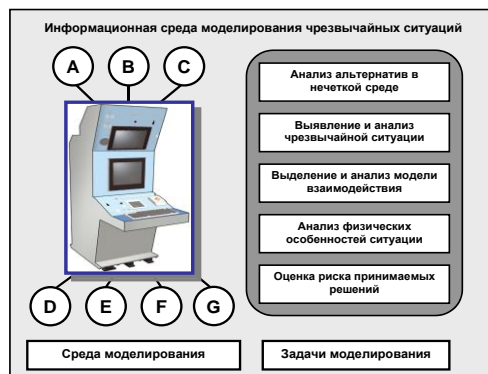


Рис. 2. Информационная среда интерпретации решений при моделировании чрезвычайных ситуаций: А – численный анализ; В – метод фазовой плоскости; С – теория графов; (D – G) – динамические среды нечеткого (D), нейросетевого (E); F – когнитивного (F) и физического (G) моделирования

Функциональный анализ информационной среды моделирования обеспечивает соответствие задач и средств моделирования с используемым вычислительным комплексом ЦЭВ. Для исходного момента времени t_0 контроля текущей ситуации в информационной среде выделяется множество необходимых задач $\text{Task}(t_0)$ и множество их функций $\text{Copt}(t_0)$:

$$\text{Cet}(t_0) = \bigcup_{p(t_0)} C_i, (\forall (i_1, i_2) \in p) \wedge (C_{i_1} C_{i_2}), \quad (1)$$

т.е. полное множество задач $\text{Cet}(t_0)$ разбивается на классы C_i в соответствии с их назначением в процессе функционирования ЦЭВ.

Инструментом описания задач С и порядком их распределения является матрица взаимодействий. Элементы матрицы обозначают интенсивность передачи данных в процессе функционирования задач, обеспечивающих идентификацию,

аппроксимацию и прогноз динамики судна путем перехода от j -го этапа выполнения отобранной последовательности к i -му.

3. Генерация альтернатив и выбор решений при контроле чрезвычайных ситуаций

Построение МПК и генерации альтернатив при выборе решения, включающей различные сценарии взаимодействия в чрезвычайных ситуациях, осуществляется в виде ситуационной модели игры с динамически меняющимся классом стратегий и управляемым сценарием (рис.3). Для решения этой задачи предварительно формулируется сценарий, описываемый конечным графом [6] – [8]:

$$G = (S_s, W_s) \quad (2)$$

где структура S_s представляет собой объединение всех рассматриваемых чрезвычайных ситуаций $S_s^{t_j}$ с учетом моментов времени, определяющих управления на интервале реализации в заданный момент времени $t_j, j=1, \dots, N$, а структура $W_s \subseteq S_s \times S_s$ описывает переходы между ситуациями с помощью отображения множества тактик оператора ИС как лица, принимающего решения (ЛПР).

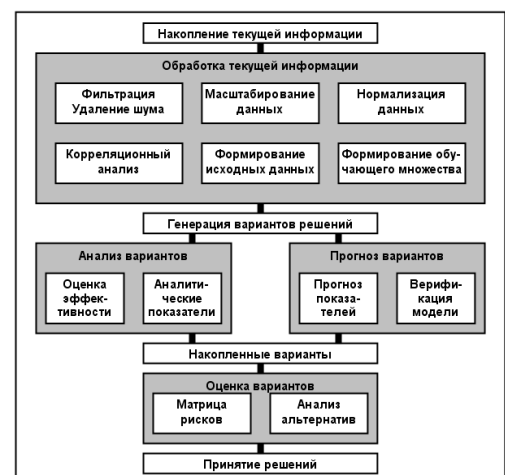


Рис. 3. Модель обработки информации при контроле чрезвычайных ситуаций

Рассматриваемая задача примыкает к задаче управления ансамблем траекторий в условиях неопределенности [5]. Однако подход к генерации альтернатив предполагает исследование поведения нелинейных нестационарных систем (NN-систем) для изолированных траекторий, которое эквивалентно задаче управления ансамблем.

Аксиома 1. При выполнении условий нерегулярности и управления с геометрическими ограничениями ансамблевый прогноз траекторий в условиях неопределенности может быть обеспечен за счет построения решений, порожденных элементами, минимизирующими функцию интерпретации пространства поведения на заданном

этапе эволюции системы в рамках динамической теории катастроф [6].

Рассмотрим применение этой аксиомы при построении ансамбля траекторий динамической модели катастроф путем генерации решений NN-системы в рамках концепции УС [15]. Пусть начальное состояние системы неизвестно заранее и задано ограничение на допустимые значения исследуемой величины $x^0 \in X^0$, где X^0 – заданное компактное множество в R^n . Тогда в каждый момент времени t известно множество альтернатив (3):

$$X(t, u(\bullet)) = X(t, u(\bullet), X^0) = U\{x(t, u(\bullet), x^0) | x^0 \in X^0\} \quad (3)$$

объединяющее все траектории системы при известном управлении $u=u(t)$ и при всевозможных векторах $x^0 \in X^0$.

Таким образом, имеем ансамбль траекторий [5]:

$$X(t, u(\bullet)), t_0 \leq t \leq t_k \quad (4)$$

порожденных множеством X^0 и управлением $u(\bullet)$ при заданном возмущении $w(t)$. Выбирая функцию $u(t)$, можно управлять множеством ансамбля в пространстве управления. Цель управления на интервале реализации заключается в том, чтобы в заданный момент времени привести ансамбль $X(t, u(\bullet))$ в евклидову ε -окрестность \mathfrak{R} , а требование оптимальности состоит в том, чтобы величина была минимальной.

Пусть управление определяется в заданном классе функций $u(\bullet) \in U$, а \mathfrak{R} – множество в R^n . Тогда евклидово расстояние точки x до \mathfrak{R} в виде символа $d(x, \mathfrak{R})$ имеет вид (5):

$$d(x, \mathfrak{R}) = \min\{x - z | z \in \mathfrak{R}\}, \quad (5)$$

а соответствующая ε -окрестность $\mathfrak{R}(\varepsilon)$ множества \mathfrak{R} определяется неравенством (6):

$$\mathfrak{R}(\varepsilon) = \{x | d(x, \mathfrak{R}) \leq \varepsilon\} \quad (6)$$

При заданной функции $u(\bullet)$ пространства управления множество $X(t, u(\bullet))$ будет полностью лежать в $\varepsilon(u(\bullet))$ -окрестности (7):

$$\varepsilon(u(\bullet)) = \max\{d(x, \mathfrak{R}) | x \in X(t, u(\bullet))\} \quad (7)$$

Следовательно, оптимальное управление u^0 , формируемое на основе оценки функции интерпретации пространства поведения должно удовлетворять условию (8)-(9):

$$\begin{aligned} \varepsilon^0 = \varepsilon(u^0(\bullet)) &= \min\{d(x, \mathfrak{R}) | x \in X(t, u^0(\bullet))\} = \\ &= \min_{u(\bullet)} \max_x \{d(x, \mathfrak{R}) | u(\bullet) \in P, x \in X(t, u(\bullet))\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$P = \{u(\bullet) | u(t) P(t)\} \quad \forall t \in T, \quad (9)$$

где $P(t)$ – выпуклое компактное множество в пространстве R^p .

Генерация сценариев взаимодействия судна с внешней средой на основе соотношений (3) – (9) осуществляется на основе модели типа «сущность – связь» [6] – [8]. В соответствии с этой структурой формируются альтернативные варианты (сценариев чрезвычайных ситуаций), сравнение и выбор предпочтительной альтернативы. Обобщенным критерием для преобразования информации при сравнении альтернатив могут служить показатель *информационной эффективности* [3]. Применительно к задачам выбора решения при контроле динамики судна в чрезвычайной ситуации этот критерий принимает имеет вид (10):

$$CR(E) = 1 - E_\alpha E_x, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad E_\alpha = (\alpha_d - \alpha(X_t)) / \alpha_d \quad (11)$$

– относительное изменение текущего параметра $\alpha(X_t)$, характеризующего динамику взаимодействия аварийного судна с внешней средой (равновесные параметры посадки, ограничения на параметры аварийной остойчивости) от предельно допустимого α_d ;

$$E_x = (X - X_t) / X \quad (12)$$

– относительное изменение текущего значения определяющего параметра (фактора) X_t ($X_t \leq X$) от выбранного значения X в заданном интервале (a, b) . Здесь X может быть регулярной, случайной и нечеткой величиной.

При интерпретации решений могут быть использованы различные модели. Наиболее простая модель связана с построением и анализом функции выбора [7],[8], позволяющей осуществлять целевое сужение множества альтернатив в системе поддержки принятия решений (ППР) при выборе и обосновании лучшего решения на основании принципа конкуренции [6]:

$$\Phi(Q) = \{q_i \in Q | U\} \quad (13)$$

где q_i – объект из множества Q , выбранный по условию U .

Условие выбора представляется в виде кортежа

$$U = \langle \sigma(t), \pi(R) \rangle, \quad (14)$$

где $\sigma(t)$ – текущая информация о состоянии судна; $\pi(R) = \langle R, T \rangle$ – множество правил выбора. R – отношения между элементами x_i, σ_i , T – тип выбора (эквивалентность, соответствие, предпочтение).

4. Оценка эффективности решений при контроле чрезвычайных ситуаций

Формализуем задачу оценки эффективности системы ППР при контроле чрезвычайных ситуаций в моделях ЦЭВ. Реализация функции управления зависит от вектора параметров $X \in R^n$, определяющих динамику судна, и вектора состояния среды $W \in R^m$ в чрезвычайной ситуации. Если $[X, W] \in A$, то решение с вектором параметров X обеспечивает поддержание состояния судна в динамической среде, характеризуемой вектором W . Если же $[X, W] \in B$ то генерируемое решение приводит к неэффективной работе системы ППР. Приведенные условия определяют решение задачи выбора решения:

$$x^*(X, W) > 0, \forall (X, W) \in A \quad (15)$$

$$x^*(X, W) < 0, \forall (X, W) \in B, x^* \in X^* \quad (16)$$

где x^* – выбранный класс разделяющих функций.

При реализации условий (15), (16) в моделях вычислительного комплекса ЦЭВ устанавливается диапазон возможных значений контролируемых параметров судна, который ограничен различными факторами, в том числе особенностями функционирования и уровнем используемых интеллектуальных технологий. Каждой конкретной реализации технического решения соответствуют определенные значения параметров, удовлетворяющих условиям [8]:

$$X_{1min} \leq X_i \leq X_{nmax}, i = 1, \dots, n \quad (17)$$

Поставим в соответствие каждой совокупности характеристик вектор:

$$H = ((Ch)_1, \dots, (Ch)_m)^T \quad (19)$$

метров для каждой реализации можно представить вектор параметров

$$X = (x_1, \dots, x_n)^T, \quad (18)$$

который принадлежит пространству параметров, определенному неравенствами (17).

Таким образом, в n -мерном пространстве пара

Вектор параметров (18) однозначно определяет характеристики судна, совокупность которых обозначим через $(Ch)_j$, $j = 1, \dots, m$. Количество характеристик определяется особенностями динамики судна в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, в n -мерном пространстве пара

Вектор параметров (18) однозначно определяет характеристики судна, совокупность которых обозначим через $(Ch)_j$, $j = 1, \dots, m$. Количество характеристик определяется особенностями ди-

намики судна в различных условиях эксплуатации.

m -мерного пространства.

В этом случае судно можно рассматривать как некоторую систему, имеющую n входов для параметров $x_i \in X$ и m выходов для характеристик $(Ch)_j$. Каждому вектору X пространства параметров (18) такая система ставит в соответствие определенный соотношением (19) вектор пространства характеристик чрезвычайной ситуации. Рассмотренная модель позволяет построить геометрическую интерпретацию различных вариантов задач, их анализа и оптимального отображения в системе ЦЭВ.

Выбор решения зависит от сложности контролируемой ситуации, в штатных ситуациях, особенно в условиях значительной неопределенности, используется коллективная стратегия выбора решения экспертами ЦЭВ. При разработке этой стратегии можно использовать подход [9], развитие которого в рассматриваемом приложении связано с учетом следующих особенностей. Рассмотрим обратную связь, характеризующую реализацию выбора решения при наличии двух возможностей выбора, которые обозначим α и β . Степень достоверности этих возможностей характеризуют числа A_α и A_β . Число экспертов ЦЭВ, **сделавших выбор α или β обозначим через X_α и X_β . При этом в процессе развития ситуации возможно изменение решений экспертов. Относительное число экспертов, желающих поменять решение α в процессе развития ситуации, пропорционально числу тех экспертов, кто уже сделал выбор β . В этом случае предпочтительность выбора определяется как $A_\beta/(A_\alpha + A_\beta)$. Аналогичным образом число экспертов, желающих поменять выбор β на выбор α будет пропорционален X_β в соответствии с формулой $A_\alpha/(A_\alpha + A_\beta)$. Это приводит к системе уравнений для X**

$$dX_\alpha/dt = \alpha X_\alpha (X_\beta A_\alpha / (A_\alpha + A_\beta) - X_\alpha A_\beta / (A_\alpha + A_\beta)) \quad (20)$$

или с учетом того, что $X_\beta = N - X_\alpha$, где N – общее количество экспертов

$$dX_\alpha/dt = \alpha X_\alpha (N A_\alpha / (A_\alpha + A_\beta) - X_\alpha) \quad (21)$$

Таким образом, различные варианты выбора влияют на эффективность системы ППР, которая является функцией мгновенного состояния судна за счет зависимости от переменных, характеризующих чрезвычайную ситуацию. Эти соображения можно обобщить на случай произвольного числа выборов K с учетом реальной ситуации, когда предпочтительность i -го варианта зависит

от номера группы экспертов, которая должна сделать выбор:

$$dX_i/dt = \alpha X_i \left(1 - X_i / \left(\sum_{i=1}^k N_j A_{ij} / \sum_j A_{ij} \right) \right), \quad (i = 1, \dots, K). \quad (22)$$

Здесь группа экспертов неоднородна и распадается на несколько подгрупп, каждая из которых имеет свое представление об относительной предпочтительности данного выбора.

Оценка риска принимаемых решений на основе разработанной стратегии ведется с использованием различных интерпретаций [2], [6] – [8]. Теория, методы и технологии разработки различных классов задач в системе оценки риска охватывают различные проблемные области [4] – [6]. Сложность и взаимосвязь этих областей на первый план выдвигают проблему оценивания качества моделей, анализа и упорядочения выбора наиболее предпочтительных моделей для решения прикладных задач. Актуальность проблемы обостряется, если динамика судна описывается полимодельным вычислительным комплексом [2], в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых оценивается своей системой показателей.

5. Критериальный базис контроля чрезвычайных ситуаций

Концептуальная модель поведения судна в чрезвычайных ситуациях формализует процессы построения прикладных задач и критериальных функций для интерпретации процессов взаимодействия на интервале реализации. На рис.4 представлена последовательность операций, определяющая критериальный базис оценки безопасности судна в виде основных этапов определения параметров внешней среды, динамики взаимодействия, а также стадии эволюции при прогнозе поведения судна.



Рис.4. Критериальный базис оценки динамики судна на этапах функционирования пространства поведения

Совершенствование теоретического, методологического и технического обеспечения оперативного контроля чрезвычайных ситуаций связано с использованием двух систем критериальных оценок (рис.5). Первая (локальная) система критериев связана с обеспечением условия безопасности и может быть реализована на основе разработанных нормативов в виде встроеной

процедуры правил логического вывода. Вторая (глобальная) система включает национальные и международные требования, которые обеспечиваются независимо от особенностей динамики судна.

Локальная система разрабатывается в процессе создания динамической базы знаний и учитывает характерные особенности поведения исследуемого судна. Совершенствование локальной системы осуществляется в направлении создания нечеткой системы критериев, основанной на методах формализации информации с учетом ее неполноты и неопределенности в рамках концепции «мягких вычислений» [17].

Переход от локальной системы к глобальной осуществляется через описание (концептуальную модель системы), фиксирующее сведения о моделируемом судне и процессе взаимодействия в терминах типовых конкурирующих математических моделей и структур знаний. При выборе схемы имитационного моделирования чрезвычайной ситуации вводится понятие среды функционирования, позволяющее использовать информацию прикладного характера о целях моделирования, закономерностей эволюции системы, имеющемся математическом аппарате для исследования методов и алгоритмов принятия решений по управлению судном. Таким образом, объектом рассматриваемой прикладной теории нормирования характеристик судна является процесс моделирования.

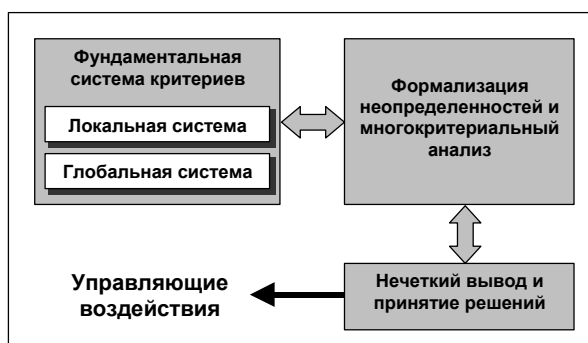


Рис. 5. Критериальный базис при нормировании экстремальной ситуации

Практическая реализация сформулированного подхода связана с созданием нечеткой системы логических правил базы знаний ИС [2], [6] – [8]. Одна группа правил позволяет определить оценку опасности ситуации, другая — направлена на ее предотвращение и может быть осуществлена непосредственно в управлении для принятия решений по снижению скорости ДО и изменению курсового угла.

6. Оценка адекватности моделей поведения судна при контроле чрезвычайных ситуаций

Стратегия оценки адекватности вычислительного комплекса ЦЭВ (рис.6) определяет формализацию процедуры на основе учета факторов, характеризующих априорную информацию [2],

концепцию MDL [4] и проблему сложности [10]. Как следует из этого рисунка, проблема адекватности решается путем интеграции априорной информации, определяющей выбор решения в соответствии с концептуальной моделью динамической теории катастроф [6], адаптируемой применительно к рассматриваемой проблеме.

Оценка адекватности ведется на основе модифицированной схемы О. Балчи [12] для конкретного приложения с целью учета данных физического, нейро-нечеткого и нейро-эволюционного моделирования (рис.7). При этом усовершенствования состояли в рассмотрении модели взаимодействия как составной части базирующегося на ней практического приложения – задачи моделирования чрезвычайных ситуаций при функционировании программного комплекса на основе принципа конкуренции.

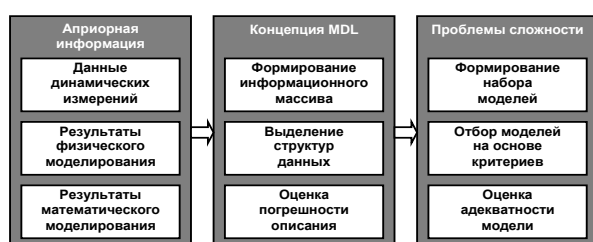


Рис.6. Поток информации, определяющий стратегию оценки адекватности модели взаимодействия в чрезвычайной ситуации



Рис.7. Модифицированная методологическая схема оценки адекватности нейросетевых и стандартных (традиционных) моделей: M, S, P – циклы преобразования информации

Первый цикл связан с разработкой конкурирующих моделей (modeling – M), реализуемых на основе нейродинамической системы (ND-системы) и методов классической математики. В процессе выполнения этого цикла реализуется структурный и параметрический синтез нейронной сети в задачах NF и NE моделирования, а для конкурирующей модели – оценка общей структуры и компонент в рамках процедур последовательного статистического анализа.

Второй цикл относится к реализации соответствующих математических (имитационных) экспериментов, выполняемых с конкурирующими моделями (simulation – S) для заданных начальных условий и элементов входного вектора. Здесь формируются NF и NE модели анализа банка данных, на основе которых реализуется вычислительный эксперимент, генерация и анализ альтернатив и оценка адекватности. Построение и анализ конкурирующей модели ведется в соответствии с формализацией задачи в условиях значительной неопределенности в соответствии с алгоритмом [6].

Третий цикл – наиболее важный. Он состоит в проведении физических (physical – P) экспериментов, на базе которых формируются модели, обеспечивающие оценку адекватности в условиях полной неопределенности. На этом цикле в ND-системе формируются компоненты NF и NE моделей с использованием данных физического моделирования, реализуется вычислительный эксперимент и оценка адекватности.

Интеллектуальная поддержка процедур M, S, P обеспечивается системой управления вычислениями и визуализацией результатов моделирования. В качестве оценок адекватности нечетких, нейросетевых и конкурирующих моделей следует придерживаться рекомендаций, изложенных в работе [8].

Заключение

Рассмотренные концептуальные решения реализуют стратегию динамической теории катастроф, определяющую эволюцию судна в условиях непрерывного изменения поведения объекта и внешней среды. Управление процессом взаимодействия, обеспечивается уровнями функционирования структурных компонент ЦЭВ с использованием диалоговой системы управления, обеспечивающей анализ состояний контролируемого судна, выработку управленческих решений и их реализации, на основе проблемно-ориентированной бортовой ИС.

Мультимодельный комплекс ЦЭВ содержат алгоритмы взаимодействия и среды функционирования, а также модели визуализации, реализующие выполнение вычислений и представление данных с использованием элементов современной когнитивной компьютерной графики. Операции, определяющие поток информации на основе динамической теории катастроф и интеллектуальных технологий, реализуется в рамках концептуальных решений при контроле чрезвычайных ситуаций в нестационарной динамической среде.

Выполнение оперативного и долгосрочного планирования сценариев развития чрезвычайных ситуаций организуется в виде модели с динамически меняющимся классом стратегий. Генерация сценариев осуществляется на основе модели типа «сущность – связь». В соответствии с этой структурой формируются альтернативные варианты сценариев и выбор предпочтительной вы-

числительной технологии на основе принципа конкуренции. Обобщенным критерием при сравнении альтернатив служит показатель информа-

ционной эффективности и интеллектуальности системы.

Литература

1. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. Санкт-Петербург. БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
2. Бондарев В.А., Нечаев Ю.И. Искусственный интеллект в чрезвычайных ситуациях мореплавания. Санкт-Петербург, 2017. 336 с.
3. Васильев В.А. Принятие решений при проектировании преобразователей информации // Автоматизация и современные технологии. №11. 2003, С. 30-33.
4. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 305 с.
5. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977. 392 с.
6. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
7. Нечаев Ю.И., Петров О.Н. Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. 366 с.
8. Нечаев Ю.И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. 332 с.
9. Николис Дж. Динамика иерархических систем. М.: Мир, 1989. 488 с.
10. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. М.: Наука, 1990. 168 с.
11. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
12. Balci O. Verification, validation and accreditation // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. 1998, pp. 41–48.
13. Gallopoulos S., Housts E., & Rice J. Problem Solving Environment // IEEE Computational Science and Engineering. Summer, 1994. pp.67-72.
14. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. [Электронный ресурс]: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>.
15. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007. [Электронный ресурс]: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
16. Wille R. Restructuring lattice theory an approach based on hierarchies of concept / ordered sets / Editor I.Rival. Dordrecht-Boston, 1982.
17. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. No. 3, pp.77–84.

References

1. Barsegjan A.A., Kuprijanov M.S., Stepanenko V.V., Holod I.I. Metody i modeli analiza dannyh: OLAP i Data Mining. Sankt-Peterburg. BHV-Peterburg, 2004. 336 p.
2. Bondarev V.A., Nechaev Ju.I. Iskustvennyj intellekt v chrezvychajnyh situacijah moreplavanija. Sankt-Peterburg, 2017. 336 p.
3. Vasil'ev V.A. (2003). Prinjatie reshenij pri proektirovanii preobrazovatelej informacii . Avtomatizacija i sovremennye tehnologii, 11, 30-33.
4. Kolmogorov A.N. Teorija informacii i teorija algoritmov. M.: Nauka, 1987. 305 p.
5. Kurzhanskij A.B. Upravlenie i nabljudenie v uslovijah neopredelennosti. M.: Nauka, 1977. 392 p.
6. Nechaev Ju.I. Teorija katastrof: sovremennij podhod pri prinjatii reshenij. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress, 2011. 392 p.
7. Nechaev Ju.I., Petrov O.N. Nepotopljaemost' sudov: podhod na osnove sovremennoj teorii katastrof. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress, 2014. 366 p.
8. Nechaev Ju.I. Topologija nelinejnyh nestacionarnyh sistem: teorija i prilozhenija. Sankt-Peterburg: Art-Jekspress, 2015. 332 p.
9. Nikolis Dzh. Dinamika ierarhicheskikh sistem. M.: Mir, 1989. 488 p.
10. Solodovnikov V.V., Tumarkin V.I. Teorija slozhnosti i proektirovanie sistem upravlenija. M.: Nauka, 1990. 168 p.
11. Tihonov A.N., Arsenin V.Ja. Metody reshenija nekorrektnykh zadach. M.: Nauka, 1986. 288 p.
12. Balci O. (1998). Verification, validation and accreditation: Proceedings of the 1998 Shhinter Simulation Conference, 41–48.
13. Gallopoulos S., Housts E., & Rice J. (1994). Problem Solving Environment. IEEE Computational Science and Engineering, 67-72.
14. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. [Jelektronnyj resurs]: <http://shhshhshh.ibm.com/developershorks/architecture/library/ar-soastyle/>.
15. Urgent Computing Shhorkshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007 [Jelektronnyj resurs]: <http://spruce.teragrid.org/shhorkshop/urgent07.php>.
16. Wille R. Restructuring lattice theory an approach based on hierarchies of concept / ordered sets / Editor I.Rival. Dordrecht-Boston, 1982.
17. Zadeh L. (1994).Fuzzy logic, neural netshhorks and soft computing. Sommutation on the ASM, 37, 3, 77–84.

УДК 621.377

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ЗАДАННОГО ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА БАЗЕ СИМВОЛЬНОЙ АГРЕГИРОВАННОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Александр Борисович Тристанов

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информатики и информационных технологий,
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
старший научный сотрудник,
Институт космических исследований и распространения радиоволн
684034 Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, д. 7
e-mail: alextristanov@mail.ru

Руслан Константинович Поляков

кандидат экономических наук, доцент, начальник управления научных исследований
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: Ruslan.polyakov@klgtu.ru

Аннотация

В работе рассмотрено применение алгоритма символьной агрегированной аппроксимации в задачах поиска заданных форм поведения временных рядов для обработки статистических данных импорта/экспорта рыбной продукции. Современные системы поддержки принятия решений и стратегического планирования не мыслимы без внедрения модулей интеллектуального анализа, базирующихся на машинном обучении. Рассматриваемая задача относится к задачам интеллектуального анализа временных рядов. Алгоритм символьной агрегированной аппроксимации относится к группе алгоритмов структурно-лингвистического анализа. Приведено описание алгоритма символьной агрегированной аппроксимации и подхода к использованию его в задачах классификации временных рядов. Предложенный алгоритм имеет ряд преимуществ в поиске типовых форм поведения, заданных семантически в терминах локального поведения временного ряда с большой вариативностью. Показаны подходы к выбору параметров алгоритмов. В качестве приложения исследовались данные, опубликованные Организацией экономического сотрудничества и развития (www.oecd.org), которые представляют собой ансамбль рядов годовых статистических данных (1995-2016 г.г.). Приведены примеры применения предложенных подходов к поиску стран импорт/экспорт которых определяется наперед заданным паттерном, а также поиску стран, имеющих аналогичное поведение по примеру. Предложенный алгоритм может быть использован для широкого класса аналогичных задач и внедрен в системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: темпоральные данные, временные ряды, интеллектуальный анализ, моделирование временных рядов, сегментация.

USING MACHINE LEARNING METHODS TO SEARCH FOR THE GIVEN BEHAVIOR FORMS OF TIME SERIES BASED ON SYMBOL AGGREGATED APPROXIMATION

Alexander Tristanov

the docent, Candidate of Engineering Sciences, the Head of the Department of Informatics and IT,
Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: alextristanov@mail.ru
the Senior Researcher
Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
Mirnaya str., 7, Paratunka, Elizovskiy district, Kamchatka region, 684034, Russian Federation
e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

Ruslan Polyakov

the docent, Candidate of Economic Sciences, the Head of the Science Department,

Kaliningrad State Technical University
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: Ruslan.polyakov@klgtu.ru

Abstract

In this paper, the application of the algorithm of symbolic aggregated approximation in the problems of searching for given time series behaviour forms is considered. The problem is regarded for the processing of statistical data of import / export of fish products. Modern decision support systems and strategic planning are not conceivable without the use of intelligent analysis modules based on machine learning. The problem concerns as the task of intellectual analysis of time series. The algorithm of symbolic aggregated approximation refers to a group of algorithms of structurally-linguistic analysis. A description of the algorithm of symbolic aggregated approximation and the approach to its use in time series classification problems is given. The proposed algorithm has several advantages for the search of typical forms of behaviour, which are specified semantically in the form of a local behaviour description of the time series with large variability. Approaches to the choice of parameters of algorithms are shown. As an application investigated the data published by the Organization for Economic Cooperation and Development (www.oecd.org), which represent a series of annual statistics (1995-2016). Examples are given of the application of the proposed approaches to the search for countries whose import / export is determined in advance by the given pattern, as well as the search for countries that have similar behaviour, for example. The proposed algorithm can be used for a wide class of similar tasks and is implemented in decision support systems.

Key words: temporal data, time series, intelligent analysis, time series modelling, segmentation, object-oriented time series model.

Введение

Современные системы поддержки принятия решений и стратегического планирования не мыслимы без внедрения модулей интеллектуального анализа, базирующихся на машинном обучении.

Под машинным обучением понимают совокупность алгоритмов и методов, нацеленных на решение интеллектуальных задач с использованием вычислительной техники. К интеллектуальным задачам относят кластеризацию и классификацию объектов, регрессию, как обобщение классификации на непрерывное множество классов, поиск ассоциаций и как частный случай секвенциальный анализ.

В рамках данной работы авторами рассматривается задача поиска заданной формы поведения в темпоральных статистических данных рыбообрабатывающей отрасли.

Зачастую формулировка формы поведения осуществляется семантически в терминах локального поведения временного ряда. Примером такого описания: «ряд возрастает в течение всего периода наблюдения» или «после стабильного поведения значения ряда резко убывает». При этом, при формулировке запроса, как правило может быть графически представлено искомое поведение.

Зачастую исследования осложняются существенными объемами обрабатываемых данных, что требует применения современных вычислительных методов и подходов [1-6].

Авторами предлагается в качестве базового алгоритма представления временного ряда использовать алгоритм символьной агрегированной аппроксимации, нашедший широкое применение в различных областях. В качестве языка про-

граммирования для реализации алгоритма использовался Python, язык, ставший практически стандартом в задачах машинного обучения и обработки больших данных. В качестве вычислительной среды авторы использовали универсальную и высокопроизводительную кластерную вычислительную платформу Apache Spark. Фреймворк Spark предоставляет простой способ распараллеливания создаваемых приложений в рамках кластерных систем, что существенно облегчает работу по разработке, тестированию, обслуживанию и сопровождению.

1. Символьная агрегированная аппроксимация

В рамках данного исследования рассматривался алгоритм символьной агрегированной аппроксимации (SAX) [7,9] в качестве алгоритма построения признакового описания и автоматической классификации.

Временной ряд $x(i)$ разобьем на сегменты длительностью N , причем $N:m$, где m – размерность пространства признаков в которое проецируется данный сегмент.

Отображение F построим следующим образом:

$$F_{SAX} : Seg_k \rightarrow (p_1^k, p_2^k, \dots, p_m^k)$$

$$p_i^k = \frac{N}{m} \sum_{j=\frac{N}{m}(i-1)+1}^{\frac{N}{m}i} Seg_k(j) \quad (1)$$

Пусть $V = \{a_1, \dots, a_K\}$ - произвольное непустое конечное множество мощностью K – алфавит. a_j - элемент алфавита V или символ алфавита V .

Произвольный кортеж k -арного декартового произведения V^k называют словом в алфавите V . В нашем случае будем рассматривать слова длиной $\frac{N}{m}$. Значению каждого признака сегмента p_i^k из (1) поставим в соответствие символ из алфавита V по следующему правилу: $w_i = a_j$, если $\beta_{j-1} \leq p_i < \beta_j$ где β_j - элемент множества уровней квантования.

Уровни квантования выбираются таким образом, чтобы попадания значения временного ряда между уровнями были равновероятны.

Таким образом, каждому сегменту временного ряда было поставлено в соответствие слово W_k в конечном алфавите V .

При выбранном алгоритме сегментации S1, классификатор K будет построен следующим образом. Поскольку множество слов длины $\frac{N}{m}$, заданное в алгоритме SAX конечно, то каждому

из них может быть поставлен в однозначное соответствие номер, который, в свою очередь, будет ассоциироваться с классом из $\{C_i\}$.

SAX как автоматический классификатор имеет решающие гиперплоскости в пространстве признаков:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{ij} p_i - \beta_k = 0,$$

$$\text{где } \alpha = \{\alpha_{ij}\} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

F_{SAX} может строиться другими способами, в частности, аппроксимируя сегменты полиномами более высокого порядка, и p_i^k может быть векторной величиной, но зачастую это приводит к избыточному повышению размерности признакового пространства.

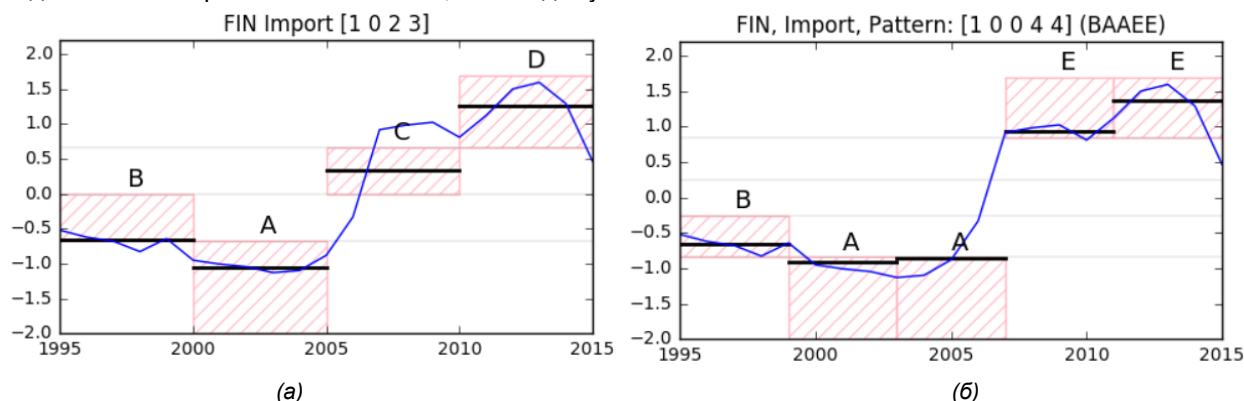


Рис. 1. Пример построения символьной последовательности для импорта Финляндии при разных параметрах алгоритма: (а) – (4,4), (б) – (5,5)

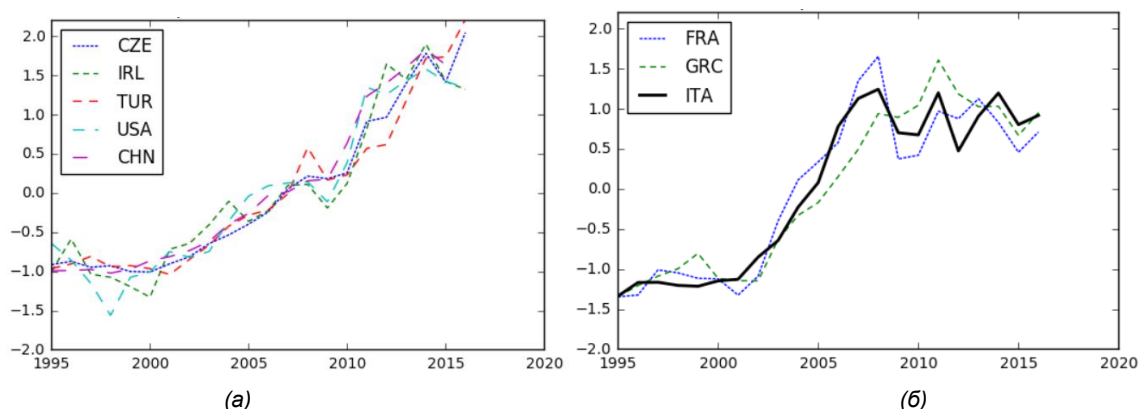


Рис. 2. Пример решения задачи поиска заданных форм поведения: (а) – по заданному паттерну, (б) – по заданному объекту (страна - Италия)

В рамках модели темпоральных данных, рассмотренной в работе [8] алгоритм SAX может

быть применен в рамках перехода между уровнями L2 и L3, т.е. является алгоритмом автома-

тической классификации сегментов временного ряда.

2. Особенности поиска паттернов временного ряда

Автоматический поиск даже типизированных паттернов методом сравнения с эталоном представляет собой сложный процесс. Сложность связана с большой масштабной вариативностью временных рядов.

В связи с этим целесообразным видится применение метода символьной аппроксимации. SAX позволяет предварительно описать в семантических терминах аномалию и далее осуществлять поиск исходя из приведенного описания.

Каждая из аномалий может быть сведена к набору примитивов, описываемых поведением линейной аппроксимации фрагмента, например, для «бухтообразного» поведения ряд сначала ведет себя стабильно, затем плавно снижается, далее резко возрастает. Данное поведение может быть описано положением среднего значения ряда в границах уровня квантования.

Предлагаемый алгоритм имеет 3 «настроечных» параметра, от выбора которых зависит качество выделяемых форм поведения. Общее количество форм поведения зависит от объема алфавита и длины слова. Большие значения этих параметров приводит к избытку форм поведения и как правило для их классификации требуются дополнительные инструменты. Третий параметр – это временная протяженность слова. От этого параметра зависит точность локализации аномалий. Как правило параметры выбираются эмпирическим путем.

3. Пример использования алгоритма SAX для статистических данных мировой торговли рыбной продукцией

Для решения задачи сравнения динамического поведения рядов импорта/экспорта рыбной продукции авторами был применен алгоритм символьной агрегированной аппроксимации. Исходные данные, опубликованные Организацией экономического сотрудничества и развития (www.oecd.org), представляют собой ансамбль

рядов годовых статистических данных (1995-2016 г.г.) по каждой стране-члену OECD.

Краткая длительность ряда не предполагает его сегментацию, или каждый ряд рассматривается как один сегмент, в терминах модели L2 [8]. Ряд экспериментов позволил выделить для данных оптимальные параметры: длина слова – 5 символов, объем алфавита – 5 символов. Таким образом, каждый символ охватывает 4-летний период данных, а результаты автоматического символьного описания коррелируют с экспертным.

На рисунке 1 показан пример, иллюстрирующий структуру символьной аппроксимации импорта рыбной продукции Финляндией для случая с разными настроечными параметрами алгоритма.

Разработанный авторами программный модуль позволяет решать две задачи: обнаружение в наборе данных рядов, имеющих заданное поведение и поиск объектов (стран), демонстрирующих аналогичное поведение. На рисунках показаны примеры.

На рисунке 2(а) показан пример рядов, обладающих схожим поведением, т.е. описываемый одной символьной последовательностью, обнаруженных по наперед заданному описанию.

Следующая задача, решаемая на основе предложенного подхода – поиск рядов, совпадающих по поведению с поведением ряда, сгенерированного данным объектом, т.е. тренд импорта или экспорта схож с трендом заданной страны. На рисунке 2(б) показан пример обнаруженных рядов.

Заключение

В данной работе рассмотрен алгоритм символьной агрегированной аппроксимации в приложении к поиску типовых форм поведения временных рядов на примере динамики импорта/экспорта рыбной продукции в разрезе отдельных стран, а также поиска стран с одинаковой динамикой.

Показано, что достаточно простой алгоритм позволяет моделировать интеллектуальный процесс сравнения временных рядов.

Литература

1. Stankova E.N., Balakshiy A.V., Petrov D.A., Shorov A.V., Korkhov V.V. Using Technologies of OLAP and Machine Learning for Validation of the Numerical Models of Convective Clouds O. Gervasi et al. (Eds.): ICCSA 2016, Part III, LNCS 9788, pp. 463–472, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-42111-7_36.
2. Raba N., Stankova E. On the Problem of Numerical Modeling of Dangerous Convective Phenomena: Possibilities of Real-Time Forecast with the Help of Multi-core Processors Murgante et al. (Eds.): ICCSA 2011, LNCS 6786, pp. 633 – 642, 2011. ISSN 0302-9743.
3. Geppener V.V., Rulenko O.P., Tristanov A.B., Firstov P.P. Using adaptive and intellectual methods for seismic noise model construction. Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2005. V.15. No.2. pp. 549-551.
4. Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Kim A.A. A New approach to study of geoacoustic emission signals. Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2016. V. 26. No 1. 34 p.
5. Marapulets Y.V., Tristanov A.B., Shevtsov B.M. Time-frequency analysis of sound range acoustic emission by the sparse approximation method. Doklady Earth Sciences. 2014. V. 456. No 2. pp. 705-708.

6. Marapulets Y.V., Tristanov A.B., Shevtsov B.M. Analysis of the structure of acoustic emission signals of the audible range by the sparse approximation method. *Acoustical Physics*. 2014. V. 60. No 4. pp. 427-435.
7. Витол А.Д., Жукова Н.А., Тристанов А.Б. Алгоритм сегментации кусочно-постоянных телеметрических параметров. *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*. 2010. Т.1, №1. С. 46-53.
8. Тристанов А.Б., Луковенкова О.О., Поляков Р.К. Модель временного ряда для задач анализа темпоральных объектов. *Морские интеллектуальные технологии*. 2016. Т. 2. № 4 (34). С. 46-50.
9. Lin J., Keogh E., Lonardi S., Chiu B. A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. *Proceedings of the 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery*. 2003. pp. 2-11.

References

1. Stankova E.N., Balakshiy A.V., Petrov D.A., Shorov A.V., & Korkhov V.V. (2016). Using Technologies of OLAP and Machine Learning for Validation of the Numerical Models of Convective Clouds O. Gervasi et al. (Eds.): ICCSA 2016, Part III, LNCS 9788, 463–472
2. Raba N. & Stankova E. (2011). On the Problem of Numerical Modeling of Dangerous Convective Phenomena: Possibilities of Real-Time Forecast with the Help of Multi-core Processors Murgante et al. (Eds.): ICCSA 2011, LNCS 6786, 633 – 642.
3. Geppener V.V., Rulenko O.P., Tristanov A.B., & Firstov P.P. (2005). Using adaptive and intellectual methods for seismic noise model construction. *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*, 15, 2, 549-551.
4. Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., & Kim A.A. (2016). A NEW APPROACH TO STUDY OF GEOACOUSTIC EMISSION SIGNALS. *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*, 26, 1, 34 p.
5. Marapulets Y.V., Tristanov A.B., & Shevtsov B.M. (2014). Time-frequency analysis of sound range acoustic emission by the sparse approximation method. *Doklady Earth Sciences*, 456, 2, 705-708.
6. Marapulets Y.V., Tristanov A.B., & Shevtsov B.M. (2014). Analysis of the structure of acoustic emission signals of the audible range by the sparse approximation method. *Acoustical Physics*, 60, 4, 427-435.
7. Tristanov A.B., Lukovenkova O.O., Polyakov R.K. (2016). Model vremennogo ryada dlya zadach analiza temporalnyh obektov. *Morskie intellektualnye tekhnologii*, 2, 4(34), 46-50.
8. Vitol A.D., Zhukova N.A., Tristanov A.B. (2010). Algoritm segmentatsii kusochno-postoyannykh telemetricheskikh parametrov. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki*, 1(1), 46-53.
9. Lin J., Keogh E., Lonardi S., Chiu B. (2003). A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. *Proceedings of the 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery*, 2-11.

УДК 377.022

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ КАДРОВ ДЛЯ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ

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

Александр Алексеевич Меркулов

начальник технопарка КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, профессор, начальник управления инновационной деятельности
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: abdurashid.yafasov@klgtu.ru

Аннотация

Проведен анализ состояния российского морского образования, показывающий сложности и вызовы на пути его переориентации от поддержки сырьевой экономики к экономике знаний. Показана методологическая особенность перехода к экономике знаний - необходимость перехода от управления знаниями к интеллектуальному управлению людьми. Интеллектуальные технологии в подготовке кадров включают генетическое проектирование образовательного процесса, конвергентную модель и сетевую организацию морского образования. Показано, что условия конвергентности можно обеспечить с помощью сетевой интерактивной лаборатории NBICS.NET на основе технологий ситуационных центров и WEB 4.0. Генетическое проектирование образовательного процесса опирается на важные принципы: важно не то, как использовать новые технологии в учебном процессе, а то, как должен выглядеть учебный процесс в век новых технологий, новая технологическая основа образования должна обеспечивать постоянную ретехнологию в соответствии с ускоряющимся процессом научно-технологического процесса.

Ключевые слова: экономика знаний, интеллектуальные технологии образования, конвергентная модель образования, генетическое проектирование, ситуационные центры, сетевая интерактивная лаборатория.

INTELLIGENT TECHNOLOGIES IN TRAINING FOR MARITIME INDUSTRY

Natalia Anatol'evna Kostrikova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Vice-rector for research
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Alexander Alekseevich Merkulov

Head of Technopark of Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

Abdurashid Yarullaevich Yafasov

Grand PhD in Technical sciences, Professor, Head of Department of innovation activities
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: abdurashid.yafasov@klgtu.ru

Abstract

Analysis of Russian maritime education, shows the complexity and challenges on the path to its re-orientation from supporting commodity economy to a knowledge-based economy. Shows the meth-

odological feature of the transition to a knowledge economy-need to move from knowledge management to intelligent people management. Intellectual technologies in training include genetic engineering educational process, converged model and network organization of maritime education. It is shown that the conditions of convergence can be provided with a network of interactive lab NBICS.NET technology-based situational centers and WEB 4.0. Genetic engineering educational process builds on the important principles: it is important not to use new technologies in the educational process, and how the educational process should look like in the age of new technologies, new educational technology framework must ensure a permanent retechnology in accordance with the accelerated process of scientific and technological process.

Key words: knowledge economy, intellectual technology education, convergent model of education, genetic engineering, situational centers, network interactive lab.

Введение

На рубеже XX – XXI веков система образования начала претерпевать значительные изменения, связанные со сменой мирового технологического уклада, наступлением «постинформационной» экономики, стремительным «сжатием» времени, отводящимся на перемены в XXI веке. Они показывают фундаментальную роль человеческого капитала в современной экономике. Человеческий капитал, в свою очередь, формируется системой образования и потому основой обновления любой страны и успешного встраивания её в экономику знаний является инновационная система образования. Насколько сегодня отечественная система образования адекватна наступающей экономике знаний? Специалисты московской школы управления «Сколково» на основе анализа социальной сети «Linkedin» выявили десять наиболее востребованных и высокооплачиваемых профессий. Все они предполагают взаимодействие человеческого интеллекта с машинным и ни одного из них нет в перечне специальностей, утвержденных Минобрнауки России [1]. Десять наиболее востребованных навыков, выявленных «Сколково», связаны с креативностью человека, критическим мышлением, умениями решать проблемы и разрешать конфликты, управлять многонациональными коллективами. То есть они предполагают гармоничное развитие общего (IQ) и эмоционального интеллекта (EQ) человека и коллективов, меритократию и развитую медиацию в обществе, в широком смысле этого слова, когда под медиацией понимают сближение позиций конфликтующих сторон до деятельного консенсуса, позволяющего направить энергию конфликта на созидание в интересах конфликтующих сторон [2]. В данной работе показана неизбежность револю-

ционных изменений в морском образовании России, рассмотрены интеллектуальные технологии в подготовке кадров, конвергентная модель образования, сетевая организация современного морского образования и необходимость генетического проектирования образовательного процесса.

Состояние российской системы морского образования

Сегодня российская система образования медленно начинает переориентироваться в своей массе с обслуживания ресурсной экономики на экономику знаний, но пока еще от неё очень далека, таблица 1, рисунок 1,2, построенные по данным [3].

Таблица 1

**Рынок труда в России: вчера, сегодня, завтра.
Доля трудоспособного населения в возрасте 15-72 года, %**

	1995	2015
Образование	8	9
Здравоохранение	6	7
Госуправление	3	7
Госпредприятия	43	7
Крупный бизнес	21	26
Малый и средний бизнес	11	16
Международные компании	1	5
Официальная безработица	9,5	5,6
Эмиграция, чел	ок. 1 млн	0,6 млн
Неформальная занятость	до 40%	20-25%

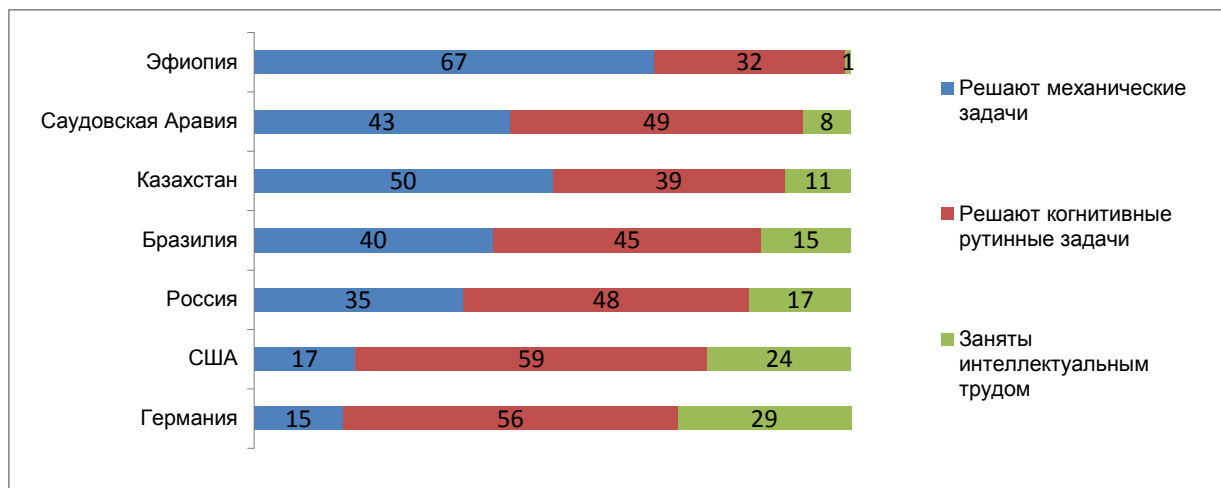


Рис. 1. Доля занятых решением различного класса задач в экономике стран, %

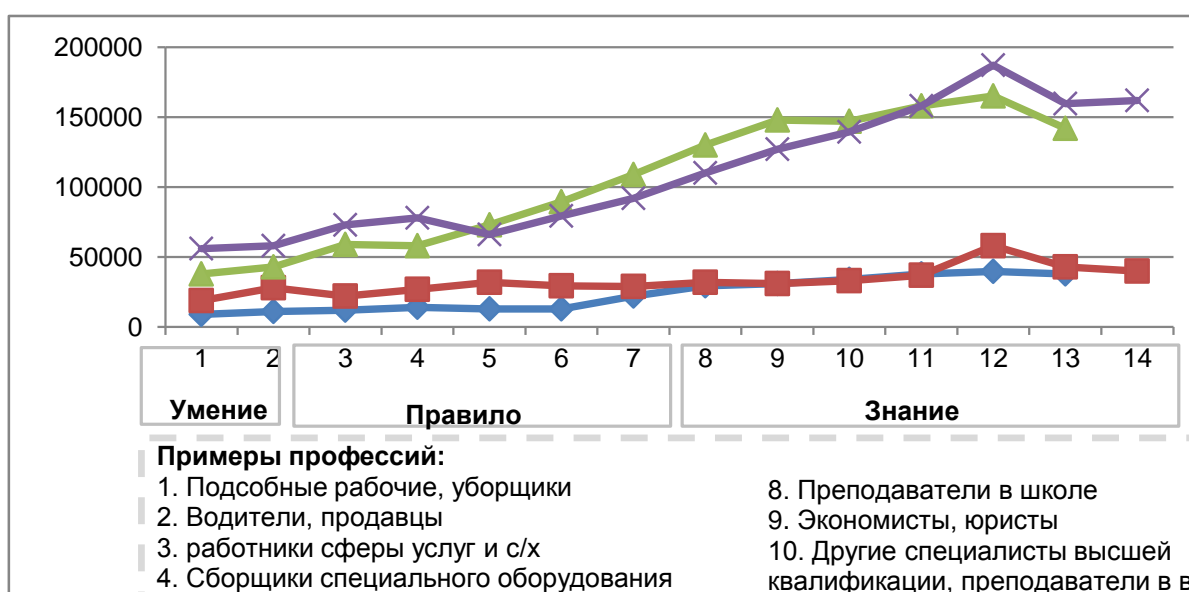


Рис.2. Совокупный доход по категориям занятости, руб. в месяц

По Гарвардскому индексу, отражающему вклад знаний в экономику страны, Россия занимает место в мире в конце 5-ого десятка. Из 10 федеральных и 29 национальных исследовательских университетов Российской Федерации только один является морским. При этом Россия входит в первую тройку стран мира с самой протяженной береговой полосой Мирового океана, а только в странах региона Балтийского и Северного морей насчитывается 36 морских образовательных организаций различного уровня, в большинстве своем развивающиеся как предпринимательские. Анализ их деятельности показывает перспективу организации морских предпринимательских университетов в России, которые могут стать определяющим стратегическим ресурсом развития приморских территорий Российской Федерации [4], недостаточно используемым сегодня. Они принципиально отличаются от всех других видов университетов, включая созданные федеральные и национальные университеты России, целями,

задачами и организацией системы непрерывной подготовки и повышения квалификации морских специалистов.

Освоение ресурсов Мирового океана содержит помимо перспектив создания новых рынков объемами в сотни миллиардов долларов в энергетике и добыче минеральных ресурсов, гигантский потенциал размещения будущих уникальных производств.

Следует обратить внимание еще на один важный тренд глобальной экономики: с тотальной автоматизацией производства, переходом его в «умное производство», характеризующееся широким использованием роботов, 3D-принтинга и других достижений современной науки, техники и технологий, производство возвращается из развивающихся экономик в развитые страны. Типичный пример представляют США, где в период с 2015 по 2020 год ожидается рост современных производственных мощностей на 50% - до половины производств, контролируемых ими. То есть кардинальным обра-

зом меняется структура и распределение мирового производства материальных благ. Это очень серьезный тренд, предвосхищающий быстрые изменения в морском транспорте.

Основные вызовы в системе образования, возникшие сегодня у мирового сообщества, можно объединить в три блока, сформулировав их следующим образом:

1. формирование новых знаний опережает их систематизацию и усвоение профессиональными сообществами, меняются структура и методы организации образовательного процесса, среда обучения требует совершенствования и взаимодействия со средой приобретения навыков и умений;

2. формирование новых профессиональных сообществ происходит вне ожидаемой связи (принцип дополнительности в естествознании) с существующими классическими сообществами, отражающими логику предыдущих технологических укладов, значительно опережает формирование знаний их социальной среды, психологии общения с такими людьми;

3. появление новых технологий происходит быстрее приобретения соответствующих навыков и умений, вследствие чего на новых рынках возникает потребность в новых профессиях, а институты образования, правовая база не успевают обеспечить этот запрос.

В обозримом будущем Мировой океан может стать средой постоянного обитания части человечества, а на стадии развития общества, основанного на мудрости – «wisdom based society», предоставлять возможности управления климатом на Земле.

Для того чтобы России окончательно не отстать в морской индустрии необходимо обратить особое внимание на гражданское судостроение, рыбопромышленный комплекс и иную морехозяйственную деятельность на принципах экономики замкнутого цикла и устойчивого развития, создать сеть морских университетов со статусом национальных исследовательских университетов на всех выходах страны к Мировому океану [5,6]. Сегодня у страны еще есть возможность ускоренного развития морехозяйственной деятельности, новой системы морского образования, способной стать фундаментом формирования новой качественной морской экономики страны.

Особенности перехода к экономике знаний: от управления знаниями к интеллектуальному управлению людьми

С переходом информационно-индустриальной экономики в экономику знаний меняется вся цепочка создания добавочной стоимости:

-ключевой актив смещается от средств производства и информации к знаниям;

-вертикаль управления активами трансформируется в профессиональное интегрированное сообщество с преимущественными горизонтальными связями;

-производственные и ИКТ-технологии реализуются в технологии сотворчества команды исполнителей;

-основной продукцией становятся инновационные продукты и услуги, в добавочной стоимости которых интеллектуальная компонента существенно превалирует над производственной и сырьевой.

Отсюда следует вывод: ключевым ресурсом развития становятся люди: генераторы, носители, проводники и реализаторы знаний, идей и новаций, а эффективное управление ими становится основным условием обеспечения развития экономики знаний.

В литературе принято называть этот процесс «управлением знаниями» (Knowledge Management - KM) [7-8], что, на наш взгляд, представляется неточным определением ключевого процесса экономики знаний. Этому есть следующее объяснение. Управление знаниями легче дается определению, структурированию и оценке, так как связано с одним основным параметром – интеллектуальным капиталом (ресурсом, объектом управления и т.д., смотря в каком срезе рассматривать процесс), который можно выразить через основное понятие – объект интеллектуальной собственности (ОИС), принятый в патентных ведомствах всех стран мира.

Интеллектуальное управление людьми в экономике представляет собой управление их компетенциями – неаддитивной, синергетической системой знаний, умений, навыков и способностей, объединенных ее ключевым системообразующим элементом и направленными на решение конкретных задач [9]. То есть, управление людьми в экономике знаний предполагает не только применение знаний, умений и навыков в качественно новой продуктивной деятельности – инновационной, но и использование способностей людей к генерации новых знаний, формированию новых умений и навыков. При этом, эффект управления растет, если оно учитывает индивидуальные особенности каждого исполнителя: ценностные ориентации, потребности, мотивы. Поэтому управление людьми (в первую очередь – интеллектуалами), кроме учета принятой оценки их знаний, навыков и умений, требует знаний их социальной среды, психологии общения с такими людьми, неординарными по определению. Они сами являются генераторами, носителями, проводниками и реализаторами знаний, идей и новаций и потому в интеллектуальном плане – в плане общего интеллекта (IQ) могут превосходить менеджеров организации (предприятия), включая ТОП-менеджмент, при этом коллективный общий интеллект творческого коллектива укладывается в векторную модель интеллекта [10].

Таким образом, на первый план при переходе от управления знаниями к управлению людьми-носителями знаний выходит эмоциональный интеллект (EQ) [11,12]. EQ характеризует знания, умения и навыки понимания и вла-

дения своими чувствами, понимания чувств других и умение воздействия на чувства других для достижения поставленной цели, в оптимальном случае не только находя интеллектуальный консенсус, но и сопереживая с партнерами. В этом случае взаимодействие интеллекта и менеджмента дает синергетический эффект, мультиплицирующий применение интеллектуального ресурса в экономике. Но такой вариант возможен преимущественно в сетевом взаимодействии участников творческого процесса производства в экономике знаний, когда производственные коллективы становятся генераторами, носителями и инвесторами коллективных знаний, часть которых всегда будет неявной, то есть не оформленной в материальном виде. Неявные знания проявляются в генерации новых знаний, в умении и навыках, как отдельных исполнителей, так и творческого коллектива в целом. Созданные коллективные знания являются основой для поиска ответов на вызовы и позволяют эффективно решать возникающие проблемы и задачи экономики.

Конвергентная модель и сетевая организация образования

Образование в экономике знаний можно представить в виде следующих основных разделов:

1. образование для получения явных знаний – технологии генерации и развития идей, технологии коллективного творчества;
2. Образование для получения неявных знаний – технологии получения и применения опыта, навыков и умений;
3. Обучение менеджменту инновационного процесса; в менеджменте инновациями важную роль играет гармония сочетаний специальных инженерно-технических знаний со знаниями современного менеджмента, психологии, медиации;
4. Обучение работе с информацией и коммуникационным навыкам и умениям; структурирование, селекция, хранение и распространение новых знаний и ОИС в виде специализированных баз данных и технологий, включая распределенные сети и ситуационные центры;
5. Обучение отвечающему на современные научно-технологические вызовы менеджменту образования.

❖ выими отношениями между участниками образовательного процесса;

❖ метод погружения обучающихся в реальные производственные ситуации, требующие, как правило, проектные индивидуализированные решения с использованием оригинальных подходов.

❖ объединение ресурсов предприятий, организаций и университетов, с соблюдением при этом принципа не равной разделенной от

Все эти разделы предполагают:

❖ новые технологии знаниецентрического образования, обеспечиваемые новыми деловыми технологиями. Рассмотрим другой срез - коллективный интеллект, генерацию коллективных знаний. Как показывает многовековой опыт творческой деятельности, наиболее революционные преобразования в инженерном деле, технической и технологической сферах имеют место на стыке наук, тому есть множество примеров, из которых следует отметить группу НБИКС – нано-, био-, инфо-, когно- и социотехнологии [13,14], возникшие и стремительно развивающиеся в последние годы благодаря достижениям в биофизике, молекулярной биологии, композитном материаловедении, нейробиологии и других стыках наук. Поэтому важным моментом, элементом организации творческой деятельности в экономике знаний является конвергентная модель сетевой организации производства, предполагающая аналогичную соответствующую конвергентную модель сетевой организации образовательно-познавательного процесса.

Для образовательно-познавательного процесса конвергентная модель рассматривается авторами в широком контексте, а именно:

❖ конвергентность участников (пользователи, технические устройства и программные сервисы), обеспечиваемая коллективной, сетевой и интерактивной работой в пределах Интернет;

❖ конвергентность целеориентированных дифференцированных возрастных групп: 3 – 6, 7 – 17, 18 – 22, 23 – 35, 36 – 50, 51-70 и т.д.;

❖ конвергентность институтов: наука, образование, бизнес, государство, общество;

❖ конвергентность различных предметных областей (априори, самые прорывные идеи и технологии возникают на стыках);

❖ конвергентность в материализации идей в концепции CDIO (CDIO – Conceive-Design-Implemer-Operate, в переводе: задумай-спроектируй-реализуй-управляй) [15].

Все эти условия конвергентности можно обеспечить с помощью сетевой интерактивной лаборатории NBICS.NET, схема которой представлена на рисунке 3, разработанной специалистами КГТУ при участии малых предприятий технопарка университета.

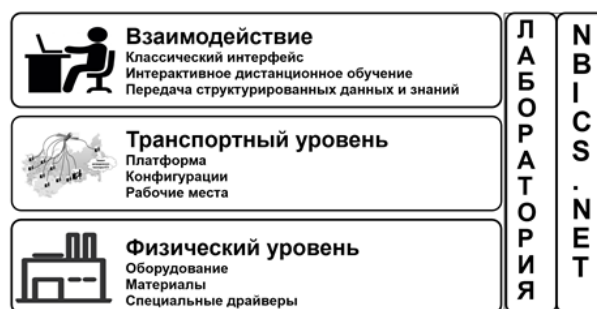


Рис.3. Сетевая интерактивная лаборатория NBICS.NET

Сетевая интерактивная лаборатория NBICS.NET одобрена Министерством образования РФ к включению в приоритетный проект «Современная цифровая образовательная среда Российской Федерации». Проект сетевой интерактивной лаборатории MariNet, по сути, 1-ый системный проект трека MariNet, опыт которого может быть перенесен на другие треки Национальной технологической инициативы.

Обеспечение сетевого интерактивного взаимодействия людей, организаций, робототехнических устройств и программных сервисов в рамках НТИ MariNet происходит на основе технологий ситуационных центров и WEB 4.0.

Состав сети:

- узлы сети – это люди, организации, робототехнические устройства и программные сервисы, использующие преимущественно NBICS технологии;

- система управления узлом – персональный ситуационный центр;

- коммуникационный интерфейс узла – WEB 4.0. Контент представлен в виде данных, открытых данных, знаний, компетенций и навыков в машинно - читаемом формате. Структура контента и сам контент формируется пользователями сети.

Функцией сети является формирование сетевого сообщества для совместного и индивидуального: образования, управления узлами сети, проектирования, производства, продвижения товаров и услуг и т.д.

Морской предпринимательский университет включает интегрированную систему, обеспечивающую обучение в течение всей жизни и через него - исключение всякого рода кризисов - среднего. Они должны стать ядрами кластеров морской деятельности, приморских региональных инновационных систем в виде четко сформулированных и воплощенных в реальности дизайнов региональных экосистем инноваций, включая обучение инноватике предпринимательских сообществ, обучение основам предпринимательства инженеров-новаторов и изобретателей, а тому и другому – сотрудников администраций муниципалитетов и органов власти приморских регионов. Университетские Центры MariNet являются первым шагом для получения опыта и формирования практик, необходимых для создания морских предпринимательских университетов MariNet – формы национального российского и одновременно глобального университета, имеющего точку дислокации и одновременно – сеть партнеров и облако участников.

Образовательная программа подготовки морских специалистов в Университете ориентирована на практическую деятельность и соот-

ветствует не только требованиям образовательных стандартов, но и в обязательном виде стандартам Международной морской организации. Важнейшей особенностью Морского предпринимательского университета является представление его в виде высокотехнологичного научно-инновационно-образовательного предприятия, непрерывно «производящего» и умножающего высокоинтеллектуальный человеческий капитал России.

Генетическое проектирование образовательного процесса

Предлагаемые решения опираются на два важных принципа.

Первый принцип, перефразируя английского кибернетика С. Бира [16], гласит, что сегодня важным является не то, как использовать новые технологии в учебном процессе, а то как должен выглядеть учебный процесс в век новых технологий.

Второй принцип требует так организовать технологическую и организационную основу образования, чтобы ее можно постоянно подвергать реинжинирингу, вслед за постоянно ускоряющимся процессом появления новых технологий.

Ответом на первый принцип является конвергентная модель сетевой организации морского образования, под которой *понимается* процесс сближения всех аспектов, возникающих не только в процессе образования, но и проектной деятельности. Модель описана выше.

Обеспечение второго принципа предлагается осуществить на основе генетического проектирования, которое предполагает, что проект разворачивается из исходной концепции, которая может корректироваться, если она не удовлетворяет внешним условиям. Впервые такой подход к проектированию организационных процессов был сформулирован в 1969 году Никаноровым С.П. [17]. Он же обосновал и предложил аппарат ступеней множеств для решения данной задачи: «эпоха складывания заменяется эпохой проектирования и строительства, что средством организации современного мышления и деятельности может быть только аппарат ступеней множеств, термы которого определяют формы с любой степенью детальности, а компьютерная реализация которого позволяет получать исчерпывающее проектное решение в считанные дни».

Авторами предложена схема (рис. 4) и технология [18] использования данного аппарата в платформе NBICS.NET

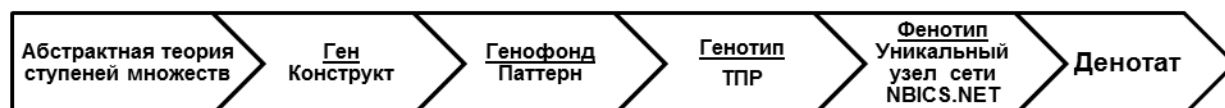


Рис. 4. Схема генетического проектирования

Здесь использованы следующие понятия: абстрактная теория ступеней множеств – это математический аппарат, который схематизирует разнообразия и отношения между ними [18]; ген-структурная и функциональная единица наследственности живых организмов; конструктор-идеализированное математическое понятие, служащее универсальным средством обеспечения сравнимости и соответствия взаимодействующих предметов; генофонд – совокупность всех генных вариаций определённой популяции, вида; паттерн проектирования – концептуальная модель, повторяемая конструкция как решение проблемы отображения инва-

риантных, структурных и ресурсных свойств предприятия, организации, объекта; генотип-совокупность генов данного организма, которая характеризует особь, ТПР - типовое проектное решение – комплект технической документации и программного обеспечения для многократного применения в типовых случаях; фенотип – совокупность характеристик, присущих организации/объекту на определённой стадии развития; уникальная организация – генотип (типовое проектное решение), заполняемый контентом и изменяемый в процессе функционирования организации, объекта; денотат – обозначаемый предмет/организация.



Рис.5. Абстрактная теория ступеней множеств

На рис. 5 представлено направление синтеза системы от абстрактной теории ступеней множеств до денотата. На рис. 4 эта же схема разложена по трем направлениям: концептуальное, инструментальное и разработка, где:

X0, Y0, Z0 – базисные множества (абстрактная теория ступеней множеств);

X1, Y1, Z1 – ученый, ген, база данных;

X2, Y2, Z2 – системщик, генофонд, средний слой;

X3, Y3, Z3 – прикладник, генотип, интерфейс;

X4, Y4, Z4 – пользователь, фенотип, контент

X5, Y5, Z5 – сотрудник, организация, речь (денотат).

Та же идея, но в трехмерном виде представления на рис. 6.

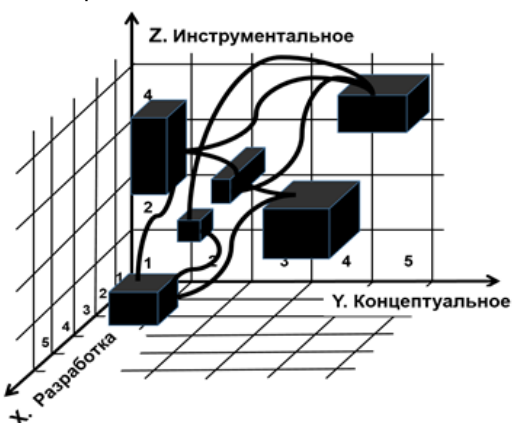


Рис. 6. Трехмерная схема взаимодействия разработчиков, инструментов и концептуальных моделей

Заключение

Предложенная схема с использованием технологии генетического проектирования на платформе NBICS.NET может найти применение в различных направлениях образовательной, научной и предпринимательской деятельности морских предпринимательских университетов:

- нишевое и специальное судостроение, морские производственные платформы;
- Hi-Tech интеллектуальные системы мореплавания, включая E-Navigation, умные бортовые системы мониторинга состояния судна и др. объектов морского базирования;
- морская логистика и транспорт, критериальная база и архитектурные решения для обеспечения безопасности мореплавания и функционирования портовых комплексов;
- исследования и добыча ресурсов (включая рудные), глобальный мониторинг биоресурсов океана, долгосрочные прогнозы развития морской промышленности;
- промышленное рыболовство, добыча и переработка морской биопродукции в концепции системного предпринимательского подхода к ресурсам океана;
- Hi-Tech в культивировании и переработке морских биоресурсов в целях здравоохранения и качественных продуктов питания, пищевые и биотехнологии;
- региональная энергетика, включая офшорную и подводные коммуникации;
- техносферная безопасность и природообустройство;

➤ комплексное планирование и реализация устойчивого развития 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, включая подводную и воздушную.

Выполнение работ в перечисленных направлениях обеспечит устойчивое развитие и статус России как глобального игрока в Мировом океане, целостное видение будущей море-

хозяйственной деятельности страны, конкурентоспособной в 21 веке с лучшими экономиками других стран, профессиональные компетенции морских специалистов для «экономики знаний». С учетом исторически креативного мышления народов России, он дает уникальный шанс стране включиться достаточно быстро в экономику знаний. Важно понять, какой страна хочет стать и она может стать такой.\

Работа выполнена в рамках гранта " Развитие НТИ -II", договор номер:151ГРНТИС5/35877 от 21.07.2017,

тема «Распределенная интеллектуальная система управления прибрежными инфраструктурными объектами и территориями на основе технологий ситуационных центров».

Литература

1. Президент «Сколково»: хороший работник не похож на конвейер или компьютер //Электрон. дан. Режим доступа URL : <https://www.newkaliningrad.ru/news/community/13576745-andrey-sharonov-khoroshiy-rabotnik-ne-pokhozh-na-konveyer-ili-kompyuter.html> (дата обращения: 14.08.2017).
2. Социальная значимость медиации в инновационном предпринимательстве / В.А.Волкогон, Н.А. Кострикова, А.Я. Яфасов // Труды X межд. науч. конф. «Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2012», г. Калининград. 2012. КГТУ, 2012. С. 181-183.
3. Ломская Т. Потерянное двадцатилетие // Ведомости. 2017. № 4378.
4. Волкогон В.А., Кострикова Н.А., Яфасов А.Я. Морское образование – стратегический ресурс развития Калининградского региона // Известия БГАРФ. Т. 33. № 3. С. 7–31.
5. MariNet - распределенные системы морехозяйственной деятельности / В.А.Волкогон и др. // Материалы рабочей группы. М. АСИ. КГТУ, 2015. С. 40.
6. Волкогон В.А. КГТУ - время реальных перемен // Образование: цели и перспективы. 2016. № 37. С. 106-113.
7. Нонака И., Такеучи Х. Компания - создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах. М.: Олимп-Бизнес, 2003. 384 с.
8. Knowledge Management // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.knowledge-management-tools.net/> дата обращения: 14.08.2017).
9. Пермяков О. Е. Развитие систем оценки качества подготовки специалистов : дис. на соискание ученой степени доктора пед. наук. СПб., 2009. 327 с.
10. Модель векторного интеллекта в инновационной деятельности / Н.А. Кострикова, А.Я. Яфасов // Пятая международная конференция по когнитивной науке: Материалы межд. конф. в 2 т., г. Калининград 18-24 июня. 2012. Калининград, 2012. С. 456-458.
11. Гоулман Д. Эмоциональный интеллект. Почему он может значить больше, чем IQ. М.: Манн,Иванов и Фарбер, 2014. 560 с.
12. Лебединкина А.А., Яфасов А.Я. Медиация как инструмент совершенствования управления образовательной организацией // Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки (теория и методика профессионального образования). 2014. Т. 28. № 2. С. 42-52.
13. Ковальчук М.В. Конвергенция наук и технологий - прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 1. С. 13-23.
14. Прайд В., Медведев Д.А. Феномен NBIC-конвергенции: Реальность и ожидания // Философские науки. 2008. № 1. С. 97-117.
15. Современное образование: актуальные проблемы профессиональной подготовки и партнерства с работодателем: материалы конференции. Томск : ТУСУР, 2014. 310 с.
16. Бир С. Мозг фирмы. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
17. Чернышев С.Б. Корпоративное предпринимательство: от смысла к предмету // Электрон.дан. Режим доступа http://bigc.ru/theory/books/cscm/c_15.php (Дата обращения 14.08.2017).
18. Никаноров С.П. Введение в аппарат ступеней множеств и его применение. М.: Концепт, 2010. 350 С.
19. Технология управления жизненным циклом организации на основ подходов генетического проектирования / А.В. Колесников, А.А. Меркулов // Седьмая международная конференция «Системный анализ и информационные технологии», г. Светлогорск, 13-18 июня. 2017. Калининград. 2017. С. 369- 377.

References

1. *Prezident «Skolkovo»: khoroshiy rabotnik ne pokhozh na konveyer ili komp'yuter.* Elektron. dan. Rezhim dostupa URL : <https://www.newkaliningrad.ru/news/community/13576745-andrey-sharonov-khoroshiy-rabotnik-ne-pokhozh-na-konveyer-ili-kompyuter.html> (data obrashcheniya: 14.08.2017).

2. *Sotsial'naya znachimost' mediatsii v innovatsionnom predprinimatel'stve*. V.A.Volkogon, N.A. Kostrikova, A.Ya. Yafasov. Trudy X mezhd. nauch. konf. «Innovatsii v nauke, obrazovanii i biznese – 2012», g. Kaliningrad. 2012. KGTU, 2012. Pp. 181-183.
3. Lomskaya T. *Poteryannoe dvadtsatiletie*. Vedomosti. 2017. № 4378.
4. Volkogon V.A., Kostrikova N.A., Yafasov A.Ya. *Morskoe obrazovanie – strategicheskiy resurs razvitiya Kaliningradskogo regiona*. Izvestiya BGARF. T. 33. № 3. Pp. 7–31.
5. *MariNet - raspredelennyye sistemy morekhozaystvennoy deyatel'nosti*. V.A.Volkogon i dr. Materialy rabochey gruppy. M. ASI. KGTU, 2015. P. 40.
6. Volkogon V.A. *KGTU - vremya real'nykh peremen*. Obrazovanie: tseli i perspektivy. 2016. № 37. Pp. 106-113.
7. Nonaka I., Takeuchi Kh. *Kompaniya - sozdatel' znaniya. Zarozhdenie i razvitie innovatsiy v yaponskikh firmakh*. M.: Olimp-Biznes, 2003. 384 p.
8. *Knowledge Management*. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://www.knowledge-management-tools.net/data/obrashcheniya>: 14.08.2017).
9. Permyakov O. E. *Razvitie sistem otsenki kachestva podgotovki spetsialistov : dis. na soiskanie uchenoy stepeni doktora ped. nauk*. SPb., 2009. 327 p.
10. *Model' vektornogo intellekta v innovatsionnoy deyatel'nosti*. N.A. Kostrikova, A.Ya. Yafasov. Pyataya mezhdunarodnaya konferentsiya po kognitivnoy nauke: Materialy mezhd. konf. v 2 t., g. Kaliningrad 18-24 iyunya. 2012. Kaliningrad, 2012. Pp. 456-458.
11. Goulman D. *Emotsional'nyy intellekt. Pochemu on mozhet znachit' bol'she, chem IQ*. M.: Mann,Ivanov i Farber, 2014. 560 p.
12. Lebedkina A.A., Yafasov A.Ya. *Mediatsiya kak instrument sovershenstvovaniya upravleniya obrazovatel'noy organizatsiyey*. Izvestiya Baltiyskoy gosudarstvennoy akademii rybopromyslovogo flota: psikhologo-pedagogicheskie nauki (teoriya i metodika professional'nogo obrazovaniya). 2014. T. 28. № 2. Pp. 42-52.
13. Koval'chuk M.V. *Konvergentsiya nauk i tekhnologiy - proryv v budushchee*. Rossiyskie nanotekhnologii. 2011. T. 6. № 1. Pp. 13-23.
14. Prayd V., Medvedev D.A. *Fenomen NBIC-konvergentsii: Real'nost' i ozhidaniya*. Filosofskie nauki. 2008. № 1. Pp. 97-117.
15. *Sovremennoe obrazovanie: aktual'nye problemy professional'noy podgotovki i partnerstva s rabotodatelem: materialy konferentsii*. Tomsk : TUSUR, 2014. 310 p.
16. Bir S. *Mozg firmy*. M.: Radio i svyaz', 1993. 416 p.
17. Chernyshev S.B. *Korporativnoe predprinimatel'stvo: ot smysla k predmetu*. Elektron.dan. Rezhim dostupa http://bigc.ru/theory/books/cscm/c_15.php (Data obrashcheniya 14.08.2017).
18. Nikanorov S.P. *Vvedenie v apparat stupeney mnozhestv i ego primeneniye*. M.: Kontsept, 2010. 350 p.
19. *Tekhnologiya upravleniya zhiznennym tsiklom organizatsii na osnov podkhodov geneticheskogo proektirovaniya*. A.V. Kolesnikov, A.A. Merkulov // Sed'maya mezhdunarodnaya konferentsiya «Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii», g. Svetlogorsk, 13-18 iyunya. 2017. Kaliningrad. 2017. Pp. 369- 377.

УДК 629.12.001.2

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ С ПОВЫШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ДАЛЬНОСТИ

Ксения Валерьевна Власова

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники
Калининградский государственный технический университет Балтийская государственная академия
рыбопромышленного флота
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: p_ksenia@mail.ru

Валерий Анатольевич Пахотин

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236038, Калининград, ул. А. Невского, 14
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Аннотация

В настоящей статье представлен алгоритм повышения разрешающей способности по дальности для систем судовой радиолокации. Он разработан на основе метода максимального правдоподобия. Традиционно для решения данной задачи используется переход к широкополосным и сверхширокополосным сигналам. Это может негативно сказаться на обеспечении электромагнитной совместимости судового оборудования. Новизна предложенной методики состоит в том, что при обработке входной реализации данных используется иной математический аппарат. База сигнала (полоса частот) при этом остаются неизменными.

Разработанный алгоритм позволяет оценить количество объектов в групповой цели и их параметры, что повышает разрешающую способность по дальности. Для оценки его возможностей был проведен модельный эксперимент. Он основан на ряде статей, в которых приведены характеристики радиолокаторов с повышенным разрешением по дальности. Расчет их потенциальной разрешающей способности по разработанному алгоритму показал, что их разрешение может быть увеличено ~в 10 раз.

Ключевые слова: радиолокация, разрешающая способность по дальности, групповая цель, метод максимального правдоподобия, модельный эксперимент.

ALGORITHM OF RADAR DATA PROCESSING WITH THE INCREASED PERMISSION ON RANGE

Kseniya Vlasova

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, associate professor at the department theoretical bases
of radio engineering
Kaliningrad state technical university Baltic state academy of the fishery fleet
236029, Kaliningrad, ul. Molodezhnaya, 6
e-mail: p_ksenia@mail.ru

Valerij Pahotin

Doctor of physical and mathematical sciences, professor at the department of radiophysics
Baltic federal university of I. Kant
236038, Kaliningrad, ul. A. Nevskogo, 14
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Abstract

The algorithm of increase in resolving power on range for the systems of a ship radar-location is presented in the article. It is developed on the basis of the maximum likelihood method. Traditionally for the solution of this task transition to broadband and ultrabandwidth signals is used. It can affect ensuring electromagnetic compatibility of a ship inventory negatively. The novelty of the offered technique consists that when processing entrance implementation of data other mathematical apparatus is used. Base of a signal (frequency band) at the same time remain invariable.

The developed algorithm allows to estimate quantity of objects in the group purpose and their parameters that increases resolving power on range. For assessment of its opportunities the model experiment was made. It is based on a number of articles in which characteristics of radars with the in-

creased permission on range are provided. Calculation of their potential resolving power for the developed algorithm showed that their resolution can be increased ~ by 10 times.

Key words: radar-location, resolving power on range, the group purpose, the maximum likelihood method, a model experiment.

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач развития морских технологий является разработка новых радиолокаторов, обладающих улучшенными тактико-техническими характеристиками (ТТХ). Существуют различные пути ее решения: совершенствование аппаратной части, использование радиолокационных сигналов с особыми характеристиками (широкополосных и сверхширокополосных). В результате интенсивного развития вычислительной техники возникло наиболее перспективное на сегодняшний день направление – разработка и создание программных комплексов для анализа радиолокационных данных. Однако, не смотря на непрерывное совершенствование алгоритмов и языков программирования, математический аппарат, лежащий в основе их работы, остается практически неизменным.

Так, для определения дальности до цели (времени приема сигнала) в подавляющем большинстве радиолокаторов используется классический корреляционный анализ. Соответственно, такая существенная ТТХ радиолокатора, как разрешающая способность по дальности, оказывается ограничена шириной корреляционной функции (базой сигнала).

В то же время теоретические исследования по обработке и анализу статистических данных привели к созданию математических алгоритмов, обладающих большим потенциалом. Их внедрение становится возможным на базе современных достижений в области электроники и вычислительной техники и открывает возможности для существенного улучшения ТТХ радиолокаторов.

В настоящей работе представлен алгоритм обработки радиолокационных данных, основанный на широко используемом при решении задач статистической радиотехники методе максимального правдоподобия (МП) [1, 2]. Основные положения данного метода хорошо разработаны и находят практическое применение при работе с сигналом, поступившим от одиночной цели. Однако актуальная на сегодняшний день задача – повышение разрешающей способности по дальности – связана с анализом данных, содержащих ряд полезных сигналов, поступивших от групповой цели. Поэтому целью настоящей работы является развитие метода МП в приложении к поиску параметров каждого объекта из групповой цели. Отличительной особенностью алгоритма, разработанного на базе преобразованного метода МП, является повышенная разрешающая способность по дальности, возможность оценить количество близко расположенных целей и их параметры.

1. Теоретические основы

Рассмотрим оценку времени приема радиосигнала методом МП. Учтем, что в поступившей на вход радиолокатора выборке данных $\hat{y}(t)$ за время наблюдения T может содержаться N полезных сигналов, отраженных от N близко расположенных целей. Их корреляционные функции частично перекрываются, поэтому оценка времени приема на основе корреляционного анализа определяет их как одну цель с некоторым промежуточным значением по дальности. Выборку данных $\hat{y}(t)$ можно представить в виде

$$\hat{y}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{S}(t - t_n) + \hat{U}_w(t), \dots (1)$$

\hat{U}_n – амплитуда сигнала, отраженного от n -ой цели;

$\hat{S}(t - t_n)$ – форма сигнала, отраженного от n -ой цели, принятого в момент времени t_n ;

$\hat{U}_w(t)$ – аддитивный шум, с нормальным распределением квадратурных компонент, средним значением, равным нулю, дисперсией σ^2 и временем корреляции τ_k .

Согласно [1, 2], для оценки параметров сигнала методом МП, требуется записать функцию правдоподобия вида

$$\ln(L(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{S}(t - t'_n) \right|^2 dt \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$$

где $\hat{U}_n \hat{S}(t - t'_n)$ – математическая модель полезного n -ого сигнала, в которой штрихами обозначены оцениваемые в ходе минимизации (2) параметры;

$\Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ – функционал правдоподобия.

Сложность непосредственной минимизации (2) заключается в наличии большого количества локальных минимумов, затрудняющих поиск истинного решения. Поэтому традиционный алгоритм работы предполагает переход к уравнениям правдоподобия за счет дифференцирования (2) по амплитудам и приравнивания дифференциалов к нулю

$$\begin{aligned} \int_0^T \left(\hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{S}(t - t'_n) \right) \hat{S}_1^*(t - t'_1) dt &= 0 \\ \vdots \\ \int_0^T \left(\hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{S}(t - t'_n) \right) \hat{S}_N^*(t - t'_N) dt &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Данная система уравнений позволяет выразить оценки амплитуд сигналов \hat{U}_n , как функциональные зависимости от времен приема t'_n . Обозначим их как $\hat{U}_n(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$. Систему (3) можно представить в виде матричного уравнения

$$\vec{\hat{Y}} = \hat{R} * \vec{\hat{U}}, \quad (4)$$

где $\hat{Y}_n = \int_0^T \hat{y}(t) \hat{S}_n^*(t - t'_n) dt$ – элементы вектора $\vec{\hat{Y}}$;

\hat{U}_n – элементы оцениваемого вектора $\vec{\hat{U}}$;

\hat{R} – корреляционная матрица, составленная из элементов $r_{ij} = \hat{S}_i(t - t'_i) \hat{S}_j^*(t - t'_j)$, где $i, j = 1, 2, \dots, N$.

Решение матричного уравнения (4) возможно в двух случаях. При полностью известных временах приема t'_n можно определить элементы корреляционной матрицы \hat{R} и найти значения \hat{U}_n . Однако подобные задачи не могут рассматриваться в приложении к радиолокации, так как там время приема – неизвестная величина. Полную систему уравнений можно решить и в том случае, если недиагональные элементы корреляционной матрицы равны нулю. Матричное уравнение (4) распадается на N независимых уравнений, тождественных по форме выражениям для корреляционного анализа. Поэтому существенного преимущества метода МП по сравнению с корреляционным анализом при прямом использовании уравнений правдоподобия не наблюдается.

В настоящей работе предлагается использовать (2) как дополнительное уравнение, расширяющее систему (3) при неизвестных временах приема t'_n и амплитудах \hat{U}_n сигналов, полученных от групповой цели. Если найденные оценки $\hat{U}_n(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ подставить в функционал правдоподобия (2) и раскрыть квадрат разности, то можно получить преобразованный функционал правдоподобия вида

$$\begin{aligned} \Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N) = \\ = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_0^T \left(\hat{y}^*(t) \sum_{n=1}^N \hat{U}_n(t'_1, t'_2, \dots, t'_N) \hat{S}(t - t'_n) \right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

Его можно представить как многомерную поверхность в пространстве параметров t'_1, t'_2, \dots, t'_N .

Тогда минимизация (5) – это поиск минимума данной поверхности, который может быть осуществлен методом перебора или иными известными методами. В отличие от (1), поверхность (5) будет гладкой, с единственным минимумом, однозначно определяющим все значения оцениваемых времен приема сигналов t'_n за время наблюдения T . Зная t'_n , можно оценить амплитуды сигналов, воспользовавшись (4).

Таким образом, происходит расширение возможностей метода МП для решения задачи оценки параметров каждого объекта групповой цели. Однако при этом остается неясным вопрос об определении точного количества объектов в групповой цели N , которое необходимо знать для корректной записи модели сигнала $\sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{S}(t - t'_n)$. Как правило, априорной информации об N нет. Поэтому в настоящей работе разработан специальный алгоритм, позволяющий определить N по апостериорной информации. В качестве критерия оценки количества объектов N , используется значение функционала правдоподобия (5) в минимуме. При совпадении N в выборке данных и в математической модели сигнала, значение $\Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ определяется дисперсией шума σ^2 . В случае, если N в выборке данных больше, чем N в математической модели, то «лишние» принятые сигналы суммируются с шумовыми составляющими и увеличивают значение $\Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ в минимуме. Если же «лишние» N присутствуют в математической модели, то они будут определяться на уровне шумовых максимумов, и значение функционала правдоподобия в минимуме будет по-прежнему на уровне σ^2 . Таким образом, последовательно увеличивая количество N в математической модели и фиксируя значение (5) в минимуме, можно определить такое N , при котором $\Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ впервые достигнет минимального значения. Если при дальнейшем увеличении N уменьшения значения $\Delta(t'_1, t'_2, \dots, t'_N)$ не происходит, значит, определено действительное количество объектов в групповой цели, и параметры объектов при данном N будут истинными. На рисунке 1 представлена блок-схема разработанного алгоритма.

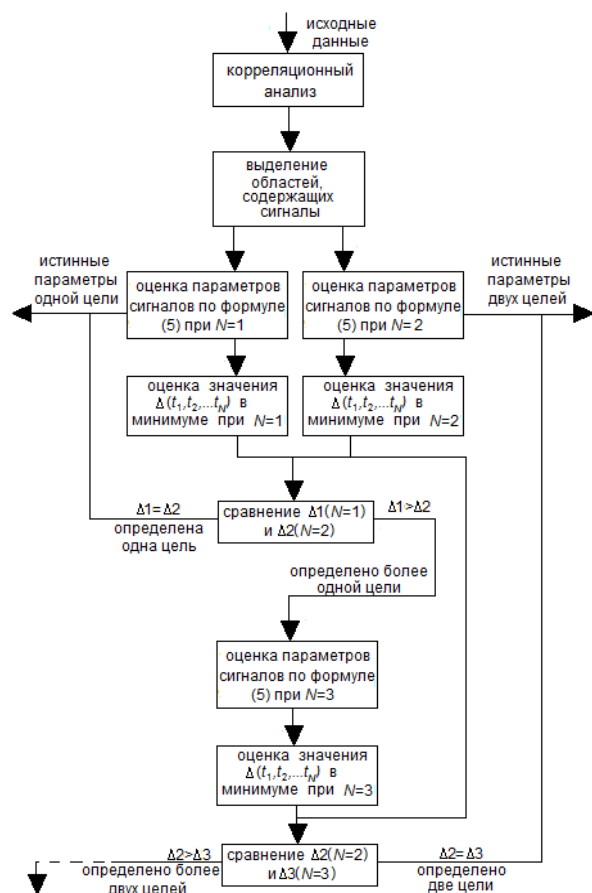


Рис. 1 Блок-схема алгоритма оценки параметров и количества объектов групповой цели

Первый этап, тождественный для большинства радиолокационных систем, предполагает корреляционный анализ данных, поступивших на вход приемника. При этом выполняется очистка

сигнала от шума, оценка областей выборки данных, содержащих полезный сигнал, а также могут быть определены параметры самого сигнала. В разработанном алгоритме корреляционный анализ предназначен для предварительной обработки, основным назначением которой является определение части выборки данных, содержащей полезный сигнал. Непосредственное применение метода МП ко всему объему данных, поступающих на вход радиолокатора, нецелесообразно ввиду его ресурсоемкости и значительных временных затрат. На втором этапе производится оценка параметров объектов групповой цели при последовательном увеличении их количества в математической модели. На третьем этапе сравниваются значения функционалов правдоподобия в минимуме при различных количествах объектов групповой цели в модели. В качестве истинного значения принимается то N , при котором значение функционала правдоподобия в минимуме определено как наименьшее.

2. Анализ результатов работы алгоритма

Проведем сравнение результатов работы рассматриваемого алгоритма и прочих методов повышения разрешающей способности по дальности. Анализ литературы [3-16], посвященной повышению разрешения по дальности, показал, что улучшение ТТХ радиолокаторов прежде всего связано с увеличением полосы частот, что не всегда оправданно, так как ведет к нарушению обеспечения электромагнитной совместимости судового оборудования. В таблице 1 приведены сведения о радиолокаторах, характеристики которых были взяты из [3-16].

Таблица 1

ТТХ РЛС, характеризующиеся повышенным разрешением по дальности

№	Страна, название РЛС, источник	Год	Полоса частот (МГц)	Длительность сигнала (мкс)	Разрешение по дальности (м)
1	США, РЛС исследовательского центра ВВС S [3]	1993	300	-	0.5
2	Австралия, [4]	1996	256	64	0.6
3	Китай, [5]	1996	400	-	0.5
4	США, РЛС AN/FHS-15 [6]	1996	500	-	0.6
5	США, Мичиганский институт окружающей среды [7]	1996	215, 900	-	0.3
6	Украина, Вирта ПВО Харьков [8]	1996	70, 72	2	4
7	США, [9]	1996	150	1	2
8	Томск, Институт сильноточной электроники [10]	1995	200	5 нс	1,5
9	Московский авиационный институт (МАИ) [11]	1998	500- 100	2-10 нс	0,4-1,5
10	www.timedomain. com, PulsON Technology [12]	2000	2000	0,2-1,5 нс	0,06-0,45
11	EDN Magazine [13]	2000	1-4 ГГц	1-0,25 нс	0,3-0,08
12	США, Fontana R.J. [14]	2000	3000	0,1-1,5 нс	0,03-0,45
13	Военная академия войсковой ПВО ВС РФ [16]	2011	2	212	30
14	Военная академия войсковой ПВО ВС РФ [15]	2013	1,2	212	24,9-49,8

Не смотря на различия в ТТХ, можно утверждать, что для анализа входной реализации в них используется один и тот же математический аппарат, основанный на корреляционном анализе данных. Он ограничивает их разрешающую способность по дальности шириной корреляционных функций сигналов (согласно критерию Релея). Так, на рисунке 1 представлен график зависимости разрешающей способности по дальности от полосы частот.

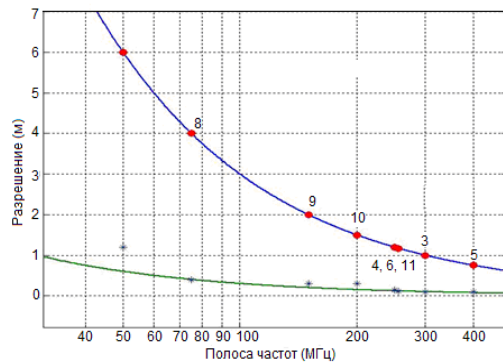


Рис. 2 Сравнительный анализ теоретических данных и результатов модельного эксперимента

Красными маркерами обозначены данные, представленные в литературе [3-6, 8-11]. Цифра рядом с маркером является ссылкой на источник. Синяя линия была получена как результат теоретических расчетов разрешения по дальности A согласно критерию Релея $A = C/\Delta f$, где Δf — полоса частот. Результаты теоретических расчетов

и заявленные в литературе ТТХ радиолокаторов соответствуют друг другу.

Зелеными маркерами обозначены результаты расчетов по разработанному алгоритму. При этом в качестве параметров исследуемых сигналов были заданы характеристики из источников [3-6, 8-11]. В результате расчетов были получены значения разрешения по дальности, существенно лучше приведенных в [3-6, 8-11]. Разрешающая способность по дальности в этом случае определялась как $A = C\Delta t$, где Δt — временной интервал, определяющий возможное разрешение по дальности при обработке данных по новой технологии.

Результаты модельных исследований показали, что при отношении сигнал/шум ~20 дБ, использование новой технологии обеспечивает повышение разрешающей способности по дальности приблизительно в 10 раз.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе был представлен алгоритм обработки радиолокационных данных, основанный на преобразованном методе максимального правдоподобия. Он позволяет оценить параметры объектов групповой цели и их количество. Разрешающая способность данного метода приблизительно в 10 раз выше, чем при использовании корреляционного анализа.

Литература

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983. - 320 с.
2. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов. - М.: Радиотехника, 2003. - 400 с.
3. Hudson S. Psaltis D. Correlation Filters for Aircraft Identification from Radar Range Profiles, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, no.3.
4. Ziweck A. and Bogner R. Target Classification of Commercial Aircraft, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, no.2.
5. Lin Pingping, Lu Guochan and HuanHuai. A C-Band Inverse Synthetic Aperture Radar System, CICR-96 (The third Chinese International Conference on Radar), Beijing, October 1996.
6. Avent R, Shelton J and Broun P., The ALCOR C-Band Imaging Radar, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1996, no.3.
7. Sheen D, Vandenberg N., et al., P-3 Ultra Wideband SAR: Description and Examples, System, 1996, no.11.
8. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П. и др. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование. - Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники, 1996, №11, с.3.
9. Бромлей, Колен. - Зарубежная радиоэлектроника, 1996, №2.
10. Осипов М.Л. - Сверхширокополосная радиолокация. // Радиотехника, 1995 г. - №3. - С.3-6
11. Иммолев И.Я. Сверхширокополосные радары. // Вестник МГТУ, 1998. - №4. - С.128-133
12. PulsON Technology. Time Modulated Ultra-Wideband For Wireless Application, 2000. - www.timedomain.com
13. EDN Magazine, 2000, December 21, p.85-92.
14. Fontana R.J. et al/ Fm Ultra Wideband Synthetic Vision Sensor for Airborne Wire Detection/ - Naval Surface Warfare Center.
15. А.А.Чижов. Некоторые закономерности проекционной теории решения обратных задач, определяющие предельные возможности по разрешению (сверхразрешению) отдельных рассеивающих элементов радиолокационных целей. - Электромагнитные волны и электронные системы. - т.18. №3, 2013, с.23-35
16. Григорян Д.С., Семченков С.М. Сверхразрешение по дальности при обработке радиолокационных сигналов с линейной частотной модуляцией когерентным методом линейного предсказания вперед-назад с прореживанием данных- журнал Радиоэлектроники (электронный журнал), № 8, 2011 г.

References

1. Tihonov V. I. Optimal'nyj priem signalov. - M.: Radio i svyaz', 1983. - 320 s.
2. Perov A. I. Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie dlya vuzov. - M.: Radiotekhnika, 2003. - 400 s.
3. Hudson S. Psaltis D. Coprrelation Filters for Aircraft Identification from Radar Range Profils, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, no.3.
4. Ziweck A. and Bogner R. Target Classification of Commercial Aircraft, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, no.2.
5. Lin Pingping, Lu Guochan and HuanHuai. A C-Band Inverse Synthetic Aperture Radar Sistem, CICR-96 (The third Chinese Internationals Cjnference on Radar) ,Beijin, October 1996.
6. Avent R, Shelton J and Broun P., The ALCOR C -Band Imaging Radar, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1996, no.3.
7. Sheen D, Vandenberg N., et.al., P-3 Ultra Wideband SAR: Description and Examples, System, 1996, nj.11.
8. SHirman YA.D., Gorshkov S.A., Leshchenko S.P. i dr. Metody radiolokacionnogo raspoznavaniya i ih modelirovaniye. - Zarubezhnaya radioelektronika: Uspekhi sovremennoj radioelektroniki, 1996, №11, s.3.
9. Bromlej, Kolen.- Zarubezhnaya radioelektronika, 1996, №2.
10. Osipov M.L.- Sverhshirokopolosnaya radiolokaciya. // Radiotekhnika, 1995 g. - №3.-S.3-6
11. Immorev I.YA. Sverhshirokopolosnye radary. // Vestnik MGTU, 1998.-№4.-S.128-133 PulsON Technology. Time Modulated Ultra-Wideband For Wireless Application, 2000.-www.timedomain. com
12. EDN Magazine, 2000, December 21, p.85-92.
13. Fontana R.J. et al/ Fn Ultra Wideband Synthetic Vision Sensor for Airborne Wire Detection/ - Naval Surface Warfare Center.
14. A.A.CHizhov. Nekotorye zakonomernosti proekcionnoj teorii resheniya obratnykh zadach, opredelyayushchie predel'nye vozmozhnosti po razresheniyu (sverhrazresheniyu) ot del'nykh rasseivayushchih ehlementov radiolokacionnykh celej.- EHlektromagnitnye volny i ehlektronnye sistemy.- t.18. №3, 2013, s.23-35
15. Grigoryan D.S., Semchenkov S.M. Sverhrazreshenie po dal'nosti pri obrabotke radiolokacionnykh signalov s linejnoj chastotnoj modulyaciej kogerentnym metodom linejnogo predskazaniya vpered-nazad s pro-rezhivaniem dannyh- zhurnal Radioelektroniki (ehlektronnyj zhurnal), № 8, 2011 g.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004: 338.26.015:303.732

МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЕЙ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СФЕРЫ**Людмила Михайловна Лукьянова**

Доктор технических наук, профессор кафедры систем управления и вычислительной техники
Калининградский государственный технический университет
236000, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: llm_llm@mail.ru

Аннотация

Несистемность (противоречивость, несогласованность, неполнота) решений, принятых по капиталоемким организационно-техническим комплексам производственной сферы (судостроительным, судоремонтным и др.), часто обнаруживается во время и после их исполнения. Это существенно снижает эффективность создания, функционирования и развития систем данного класса. Необходимость преодоления указанной проблемы, учитывая большой вес субъективных факторов и моделей в процессе подготовки и принятия решений, делает актуальной разработку методологии, объективирующей выработку решений и обеспечивающей их системность.

В статье конкретизируется системно-целевой подход к выработке решений по комплексу как системе целедостижения (СЦД). Рассматриваются основывающиеся на закономерностях целеполагания и целедостижения, анализа и синтеза целей комплексов оригинальные семиотические модели целей, структур целей, рассуждений о целях и методы анализа и синтеза целей, реализация которых в интеллектуальной системе поддержки данных процессов обеспечивает системность целей как логических оснований для синтеза функций, компонентов, структур СЦД.

Ключевые слова: производственная сфера, система целей, семиотические модели целей, интеллектуальная система поддержки анализа и синтеза целей.

A METHODOLOGY FOR AUTOMATED ELABORATION OF GOALS OF INDUSTRIAL SPHERE SYSTEMS**Ludmila Lukyanova**

Dr.Sci.Tech., the professor of department of computer science
Kaliningrad state technical university
Soviet av., 1, Kaliningrad 236000, Russian Federation
e-mail: llm_llm@mail.ru

Abstract

Contradictory, inconsistency, incompleteness of decisions on capital-intensive organizational-and-technical complexes (the shipbuilding complexes and others), usually detected during or after their execution, being a reason for the significant decrease in the efficiency of creation, function, and development of the complexes. Make it urgent to do actual development of a methodology that provides objectification of decision-making process and its systemic results.

The article specifies the system-goal approach to decision-making process on the complex as a goal-achieving system (GAS). Original semiotic models of goals, structures of goals, reasoning about goals and methods of goals analysis and synthesis based on patterns of goal-setting, achieving, analysis and synthesis of goals realized in intelligence system supporting analysis and synthesis of goals are considered. The system provides logical correctness and completeness of goals used as the logical basis for synthesis of GAS's functions, components, structures.

Key words: the industrial sphere, the system of goals, the semiotic models of goals, the intelligence system supporting analysis and synthesis of goals.

Введение: пути обеспечения системности решений в производственной сфере

Увеличение сложности и капиталоемкости организационно-технических комплексов производственной сферы (судостроительных, судоремонтных и др.), а также веса субъективных факторов в процессе выработки решений по данным системам, обострило проблему неполноты, противоречивости, несогласованности решений.

Несистемность решений, часто выявляемая во время и после их исполнения, существенно снижает эффективность создания, функционирования и развития комплексов, что вызывает необходимость поиска новых подходов и методов, объективирующих выработку решений.

Обсуждающаяся в работах [1–4] возможность обеспечения корректности решений путем интеграции методов принятия решений, системной методологии и искусственного интеллекта (в частности, семиотических моделей логико-лингвистического типа [5]), способствовала выбору и увязке воедино методологических положений о логическом характере понятий «система», «структура», «организация» [6], целях как логическом основании для синтеза систем [1], комплексе как системе целедостижения (СЦД), согласованности функций, компонентов, структур СЦД с целями и обоснованию системно-целевого подхода [7] к выработке решений по комплексу при уточнении роли целей в данном процессе и этапов: 1 – формирование системы целей (СисЦ); 2 – синтез функций, компонентов, структур СЦД.

Но цели – субъективны по своей природе. К тому же конечные цели комплексов сложны и неопределенны, в силу чего целеполагание (ЦП) неявно осуществляется в процессах анализа и синтеза целей, результатами которых являются структуры целей (СЦ): аналитическая (АСЦ) и синтетическая (ССЦ). Недостаточная изученность ЦП и зависимость целей от системы ценностей лица, принимающего решения (ЛПР), его интуиции, биопрограмм, эмоций и других факторов могут приводить к полаганию ложных целей, логической некорректности, неполноте АСЦ и ССЦ, их несовместимости в СисЦ. Все это делает актуальным исследование моделей, методов и средств, объективирующих формирование СисЦ.

В статье рассматриваются основные компоненты методологии формирования СисЦ: концептуальная модель человекомашиной реализации данного процесса, логико-лингвистические модели цели и рассуждений о целях, графосемантические модели АСЦ и ССЦ и основывающиеся на них методы, реализованные в интеллектуальной системе поддержки анализа и синтеза целей.

1. Постановка задачи формирования системы целей

Под целью понимается запечатленный в естественно-языковой (ЕЯ) форме образ предвосхищаемого ЛПР и представляющего для него ценность результата деятельности/действия.

В результате эмпирического исследования свыше полутора тысяч целей производственной сферы (примеры формулировок целей приведены в [8]) осуществлена их систематизация и классификация. Основные классы целей отражают *производственный, экологический, управленческий, экономический, научно-технический* и *социальный* аспекты деятельности по созданию, функционированию, развитию комплексов. Дополнительные классы целей (признаки классов: приоритет, характер локализации, время/стадия жизненного цикла, степень сложности и определенности): *главные – неглавные, глобальные – локальные, постоянные – временные, конечные – начальные, сложные – простые, определенные – неопределенные*, – позволяют получить требуемые для обеспечения управляемости комплексов проекции целей основных классов.

Требуемое множество проекций логически корректных, полных и согласованных пар <АСЦ, ССЦ>, полученное путем конкретизации целей основных классов дополнительными признаками, определяет соответствующие пары структурных компонентов СисЦ.

2. Концептуальная модель формирования системы целей

Упрощенная модель формирования СисЦ, комплекса дана на рис. 1. Формирование СисЦ включает этапы анализа и синтеза целей, результаты которых согласованы между собой.

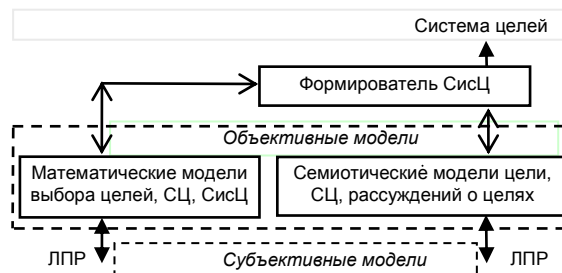


Рис. 1. Концептуальная модель формирования СисЦ

Анализ целей – многократное выполнение следующей ядерной процедуры: выработка стратегий анализа цели; полагание при их применении альтернативных совокупностей менее сложных и более определенных целей; оценка их логических значений; выбор из истинных альтернатив рациональной; представление анализируемой цели и выбранной совокупности целей в виде куста G_k^a графа целей G^a (рис. 2,а):

$$G^a = \langle C, U \rangle, \quad (1)$$

где C – множество вершин, обозначающих цели i -х уровней, $i = 0(1)(m-1)$; U – множество дуг, обозначающих отношение подчинения R^i , определенное на целях i -х и $(i+1)$ -х уровней.

Синтез целей – обратный анализу целей двухэтапный процесс. На первом этапе G^a переформируется в граф GN^c (начальная мо-

дель ССЦ, или структурной схемы целедостижения (ЦД)) добавлением вершины cc_m (cc_4 на рис. 2,б) и дуг, связывающих ее с вершинами GN^C , являющимися висячими в G^a , и изменением направления дуг U на обратное. Ядерная процедура второго этапа (собственно синтез): выработка стратегий синтеза цели в процессе ее мысленного достижения с помощью результатов, намеченных совокупностью связанных с ней це-

лей; полагание в ходе их применения альтернатив цели, уточняющих соответствующую цель графа GN^C ; оценка их логических значений; выбор из истинных альтернатив рациональной; представление совокупности целей и переопределенной цели в виде куста GK_K^C (в общем случае более сложного фрагмента) графа целей GK^C как модели конечной ССЦ (рис. 2,б).

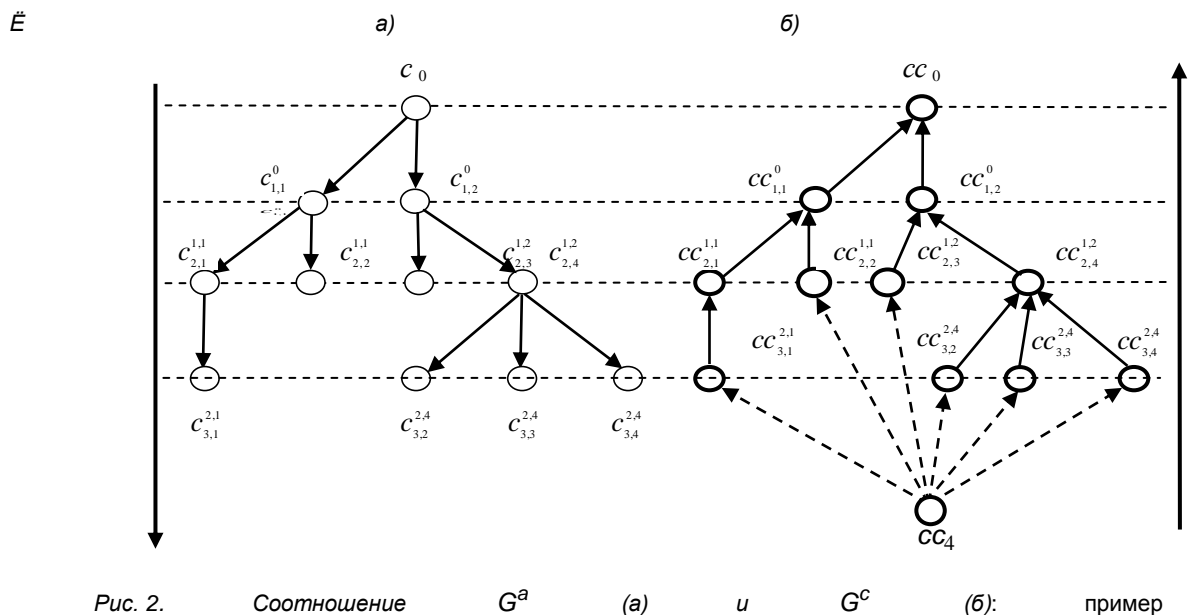


Рис. 2. Соотношение G^a (а) и G^C (б): пример

Для устранения в процессе формирования СисЦ возможной логической некорректности анализа и синтеза ЛПР целей осуществлена конкретизация концептуальной модели (см. рис. 2) такими компонентами как (рис. 3):

- модели цели: лингвистическая (для реализации в языке L , близком к ЕЯ) и логическая (обеспечивающая выявление семантики отношений на целях);
- графосемантические модели СЦ (позволяющие определять логическую корректность, полноту и совместимость АСЦ и ССЦ в СисЦ);
- семиотическая система рассуждений о целях (обеспечивающая обоснование логической корректности и полноты целей в СЦ);
- методы формирования АСЦ и ССЦ, удовлетворяющих критериям логической корректности, полноты и совместимости в СисЦ;

- интерфейсы интеллектуальной системы поддержки анализа и синтеза целей (СПАС-Ц).

Опишем наиболее важные интерфейсы:

- I_{11} – интеллектуальный интерфейс взаимодействия ЛПР с семиотической системой рассуждений о целях (на основе языка цели L);
- I_{21} – интерфейс взаимодействия ЛПР и формирователя СисЦ (на основе графосемантических моделей АСЦ, ССЦ и языка L);
- I_{31} – интерфейс взаимодействия ЛПР со средствами выбора целей (например, с системой Expert Choice [9]);
- I_{41} – интерфейс взаимодействия ЛПР со средствами планирования ЦД (например, с системой управления проектами Spider project [10]);
- I_{23} – интерфейс исполнителей решений с формирователем СисЦ (на основе графических представлений и ЕЯ-описаний целей).

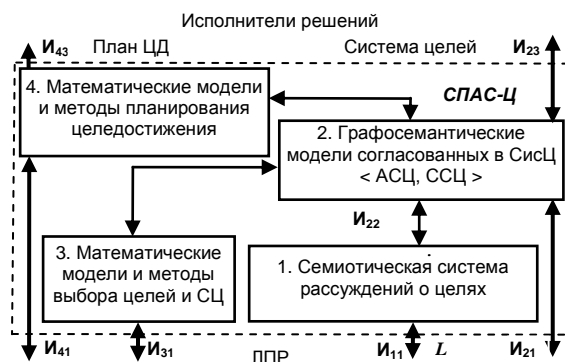


Рис. 3. Конкретизированная концептуальная модель

3. Модели и язык цели

Реализация интеллектуального интерфейса I_{11} (см. рис. 3) потребовала формализации семантики цели. В качестве лингвистической модели цели предложен основывающийся на закономерностях ЦП и ЦД [11], выражающих обобщенную функциональную семантику компонентов комплекса и устанавливающих возможность наличия в ЕЯ-формулировке цели контекстной (нецелевой) части, ролевой фрейм «средства-результат» (предложение-цель):

$$\langle \langle u^i \dots \rangle [\langle u^j \dots \rangle] \dots \rangle$$

(2)

где u^i (u^j) – имя r_i -й (r_j -й) роли, $i, j = 1(1)n$, n – число ролей, внутренние угловые скобки выделяют ролевые фразы предложения-цели.

В следующем варианте данного фрейма:

<Производство: <агента><технология управления><техника> <исходный объект><технология
производства><место><конечный объект>>,</p>
</div>

для производства в комплексе результата (фраза «конечный объект») используются средства шести видов (фразы с остальными ролями).

Слоты фрейма (фразы f_j) замещаются именами целевых (представляющих ценность для ЛПР) или контекстных компонентов комплекса, определенных требуемыми свойствами (фенотип).

Рассмотренная лингвистическая модель реализована в языке цели L (близком к ЕЯ), заданном двухуровневой КС-грамматикой, дополненной семантическими правилами, учитывающими межфразовый и внутрифразовый контексты цели.

В качестве логической формы цели, позволяющей оценивать истинностное значение цели и возможные ошибки анализа-синтеза целей ЛПР, адекватна импликативная формула, а для перехода из лингвистической формы (2) в логическую и обратно разработаны преобразователи $O = \{O_t\}$, $t = 1, 2, \dots, p$. Для приведенного выше варианта фрейма это O_1 :

$$O_1: c = [f_i [f_j] \dots] f_7 \leftrightarrow F = [f_i [\wedge f_j] \dots] \supset f_7, \quad (3)$$

где f_i, f_j, \dots, f_7 – фразы предложения-цели с i -й, j -й, ..., 7-й ролью соответственно, $i, j = 1(1)6$, $i \neq j$.

4. Графосемантические модели СЦ

Для оценки логической правильности анализа/синтеза целей и корректности АСЦ/ССЦ определены соответствующие графам $G^a(1)$, GN^c , GK^c семантические графы ${}^cG^a$, ${}^cGN^c$, ${}^cGK^c$:

$${}^cG^a = \langle C, U \rangle, \quad (4)$$

где C – множество вершин, обозначающих цели i -х уровней, $i = 0(1)(m-1)$; U – множество дуг, которому поставлено в соответствие множество семантических отношений подчинения ${}^cR^p$ на целях (точнее, на фразах предложений-целей) связывающих цели i -х и $(i+1)$ -х уровней.

Семантическое отношение cR_q задается парой $\langle I_g, {}^cR_q \rangle$, где I_g – имя отношения, $I_g \in I$, I – множество имен. В соответствии с закономерностями анализа и синтеза целей [11] $I = \{I^1, I^2, I^3\}$, где I^1 – множество имен семантического отношения подчинения ${}^cR^p$ целей в кусте ${}^cG_k^a$ (подчинение «результатом-средства», ..., «целым – частью»), I^2 – множество имен семантического отношения сопоставимости ${}^cR^{cp}$ целей куста ${}^cG_k^a$ (сопоставимости подчиненных «средств», ..., «частей»), I^3 – множество имен семантического отношения полноты ${}^cR^{pn}$ целей куста ${}^cG_k^a$ (полноты сопоставимых «средств», ..., «частей»). Отношения ${}^cR^{cp}$ и ${}^cR^{pn}$ не являются структурными.

Уточненный семантический граф целей ${}^cG^a - ex$ – граф, полученный путем задания на вершинах графа целей ${}^cG^a$ семантического отношения значимости ${}^cR^3$ и исключения (в случае

127

ресурсных ограничений) наименее значимых в текущей ситуации вершин, составляющих подмножество EX , $EX=\{c_j\}$, $EX \subset C$, инцидентных им дуг и ветвей графа ${}^cG^a$, утративших с ним связь в результате указанных действий.

Семантический граф целей ${}^cGN^c$ – результат преобразования графа ${}^cG^a$ (или ${}^cG^{a-ex}$) путем: 1) замены определенных на его вершинах (C или C^{a-ex}) отношений ${}^cR^p$ на их инверсию $({}^cR^p)^{-1}$; 2) добавления начальной вершины cc_m и дуг, связывающих ее с вершинами, являющимися концевыми в графе ${}^cG^a$ (или ${}^cG^{a-ex}$).

Уточнение графа ${}^cGN^c$ в результате синтеза и полагания целей обеспечивает формирование семантического графа целей ${}^cGK^c$.

5. Модель рассуждений о целях

В качестве средства рассуждений о целях построена семиотическая система (модель) лингвистического типа [12]:

$$S = \langle T, B, A, P, \Psi_T, \Psi_B, \Psi_A, \Psi_P \rangle, \quad (5)$$

где T – множество основных символов (*фраз предложений-целей*, имен семантических отношений на целях, ...); B – множество синтаксических правил, применение которых к элементам из T позволяет получать правильно построенные формулы (ППФ); A – некоторое подмножество ППФ; P – множество семантических правил, применение которых к элементам из A и выведенным ППФ обеспечивает получение новых ППФ; $\Psi_T, \Psi_B, \Psi_A, \Psi_P$ – множество правил изменения соответственно множества T, B, A, P .

S представляет собой частично упорядоченное множество формальных подсистем, задаваемых первой четверкой компонентов в (5), смена которых в процессе функционирования S реализуется правилами $\Psi_T, \Psi_B, \Psi_A, \Psi_P$.

Множество A – компонент базовых знаний S об АСЦ, $A = {}^1A \cup {}^2A$, где 1A – аксиомы логики утилитарных оценок, выражающие логические законы (постоянные знания), ${}^1A = {}^1A_0 \cup {}^1A_1$, 1A_0 – множество аксиом пропозициональной логики, 1A_1 – множество аксиом, включающее аксиомы логической теории изменения, частичного причинения, абсолютных оценок; 2A – схемы аксиом, выражающих закономерности [11] (ситуативные знания, становящиеся аксиомами в случае выявления на целях куста ${}^cG_k^a$ ситуаций следующих классов: 1) изолированность цели; 2) эквивалентность целей; 3) обратное непрерывное подчинение целей; 4) обратное прерывное подчинение целей; 5) прямое непрерывное подчинение целей; 6) прямое прерывное подчинение целей;

7) перекрещивание целей; 8) сопоставленность целей; 9) несопоставленность целей; 10) противоречие целей; 11) противоположность целей; 12) неполнота сопоставленных целей; 13) полнота сопоставленных целей).

При этом 5-й, 8-й, 13-й классы определяют основные состояния системы S , в которых подтверждается корректность ситуации на кусте целей ${}^cG_k^a$ графа ${}^cG^a$, остальные классы – смежные состояния, в которых опровергается корректность ситуации на целях и обеспечивается исправление ${}^cG_k^a$.

Полная семантика системы S построена на основе двухкомпонентной модели Крипке [12].

6. Методы анализа и синтеза целей

Метод автоматизированного анализа и полагания целей обеспечивает формирование ЛПР АСЦ, удовлетворяющей критериям логической корректности и полноты. Для этого система СПАС-Ц в диалоге с ЛПР, реализуемом на близком к ЕЯ языке L , с помощью семиотической модели S последовательно формирует кусты ${}^cG_k^a$ графа ${}^cG^a$, подтверждая или опровергая корректность ситуаций на целях. В последнем случае S переходит из основного в смежное состояние и исправляет некорректный куст целей).

Формирование куста целей осуществляется в процессе одного такта функционирования системы S , в течение которого настроенные в соответствие с подчиняющей целью c_α и первой подчиненной целью c_{β_1} (точнее, гипотезой ЛПР о таком подчинении) куста ${}^cG_k^a$ ситуативные знания не меняются. Модель S пытается осуществить логический вывод полагаемых ЛПР в ходе анализа c_α подчиненных целей $c_{\beta_1}, c_{\beta_2}, \dots, c_{\beta_v}, \dots, c_{\beta_m}$ (число выводов w определяется числом подчиненных целей, $w = 2m$), основываясь при этом на собственных и внешних (тезаурусная модель) знаниях о комплексе:

$$c_\alpha \mid \rightarrow c_{\beta_1}; c_\alpha \mid \rightarrow c_{\beta_2}; c_{\beta_1} \mid \rightarrow c_{\beta_2}; \dots; (6)$$

$$c_\alpha \mid \rightarrow c_{\beta_m}; c_{\beta_1} \mid \rightarrow c_{\beta_m}.$$

Выводы (6) реализуют три схемы рассуждений о целях: о подчинении целью c_α цели c_{β_v} , о сопоставимости c_{β_v} и c_{β_1} , о полноте целей $c_{\beta_1}, c_{\beta_2}, \dots, c_{\beta_v}, \dots, c_{\beta_m}$. При выявлении ложной (по подчинению (классы 1-4, 6, 7 ситуаций на целях куста ${}^cG_k^a$) либо соподчинению (класс 8 ситуаций на целях куста ${}^cG_k^a$)) цели c_{β_v} или неполноты целей $c_{\beta_1}, \dots, c_{\beta_m}$ (класс 12 ситуаций на целях куста ${}^cG_k^a$) S имитирует анализ и полагание наиболее семантически близких (для ситуации на

целях c_α и c_{β_1} текущего куста ${}^cG_k^a$) истинных и/или недостающих целей.

Метод синтеза и полагания целей обеспечивает формирование лицом, принимающим решения, ССЦ, отвечающей требованиям логической корректности и полноты путем представления системой СПАС-Ц данной СЦ вначале в виде графа ${}^cGN^c$, а затем подтверждении семиотической системой S в процессе ее функционирования соответствия указанным требованиям каждого куста ${}^cGK_k^c$ графа целей ${}^cGK^c$.

Заключение

Использование методологии автоматизированного формирования системы целей при выработке решений по ряду капиталоемких организационно-технических комплексов производственной сферы показало, что обеспечение логической корректности и полноты целей повышает степень системности принимаемых по данным объектам решений, что снижает издержки и увеличивает (в среднем на десять процентов) эффективность функционирования и развития комплексов.

Литература

1. Hall, A.D. A methodology for systems engineering. N.J.: D. Van Nostrand Company, Inc., 1965. 418 p.
2. Sengupta, S.S., Ackoff, R.L. Theory of Systems and Operations Research. Trans IEEE on SSC, v. 1, # 1, 1965.
3. Ларичев, О.И. Принятие решений как научное направление: методологические проблемы // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. 1982. Москва, 1982. С. 227–243.
4. Пospelov, Г.С. Системный анализ и искусственный интеллект. Москва: ВЦ АН СССР, 1980. 47 с.
5. Пospelov, Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. Москва: Энергоиздат, 1981.
6. Мильнер, Б.З. Теория организации. М.: ИНФРА-М, 2003. 558 с.
7. Смирнов, В.А. О возможности общей теории систем // Доклады 2-й науч. конф. кафедр общественных наук. Томск: ТГУ, 1959. С. 84–87.
8. Лукьянова Л.М. Две задачи формирования системы целей. 1. Анализ целей // Вестник БФУ им. И. Канта: физико-математические и технические науки. № 2. 2016. С. 78–84.
9. Expert Choice: электронный ресурс. URL: <http://www.expertchoice.com> (дата обращения: 30.07.2017).
10. Spider project: электронный ресурс. URL: <http://www.spiderproject.ru> (дата обращения: 30.07.2017).
11. Лукьянова Л.М. Закономерности целеполагания и целедостижения, анализа и синтеза целей комплексных систем производственной сферы // Материалы МНК «Инновации в науке и образовании – 2007». Калининград: КГТУ, 2007. С. 128–131.
12. Lukyanova L.M. Definition, Analysis and Synthesis of Goals in Complex Systems. Simulation Models and Methods. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2007, Vol. 46, No. 5, pp. 766–778.

References

1. Hall, A.D. A methodology for systems engineering. N.J.: D. Van Nostrand Company, Inc., 1965. 418 p.
2. Sengupta, S.S., Ackoff, R.L. Theory of Systems and Operations Research. Trans IEEE on SSC, v. 1, # 1, 1965.
3. Larichev, O.I. Priniatie reshenij kak nauchnoe napravlenie: metodologicheskie problemy. Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy. Ezhegodnik. 1982. M., 1982, pp. 227–243.
4. Pospelov, G.S. Sistemnyj analiz i iskusstvennyj intellekt. M.: CC AS USSR, 1980, 47 p.
5. Pospelov, D.A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemah upravleniya. M.: Energoizdat, 1981, 232 p.
6. Milner, B.Z. Teoriya organizatsii. M.: INFRA-M, 2003. 558 p.
7. Smirnov, V.A. O vozmozhnosti obtshei teorii sistem. Doklady 2nd nauch. konf. kafedr obtshestvennyh nauk. Tomsk: TGU, 1959, pp. 84–87.
8. Lukyanova, L.M. Dve zadachi formirovaniya sistemy tselej. 1. Analiz tselej. Vestnik BFU im. I. Kanta: fiziko-matematicheskie i tehicheskie nauki, No 2, 2016, pp. 78–84.
9. Expert Choice. URL: <http://www.expertchoice.com>.
10. Spider project. URL: <http://www.spiderproject.ru>.
11. Lukyanova, L.M. Zakonomernosti tselepolaganiya i tseledostizheniya, analiza i sinteza tselej kompleksnyh sistem proizvodstvennoj sfery. Materialy MNK 'Innovatsii v nauke i obrazovanii – 2007'. Kaliningrad: KGTU, 2007, pp. 128–131.
12. Lukyanova L.M. Definition, Analysis and Synthesis of Goals in Complex Systems. Simulation Models and Methods. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2007, Vol. 46, No. 5, pp. 766–778.

УДК 621.311; 658.512:005

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ 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, д. 1.
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Олег Романович Кивчун

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций института
физико-математических наук и информационных технологий,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. Невского, д. 14.
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрено применение интеллектуальных технологий для мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса, которые включают в себя информационные технологии управления электропотреблением и информационные технологии обработки данных по электропотреблению с применением вычислительной техники. Для решения задачи управления электропотреблением с помощью информационных технологий предлагается реализация методики мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса, реализующая на основе рангового анализа поиск аномалий в данных, построение типовых графиков электрической нагрузки, прогнозирование и выделение тренда электропотребления. Информационные технологии обработки данных по электропотреблению с применением вычислительной техники представлены ситуационным центром управления электропотреблением объектами припортового электротехнического комплекса, который реализует методику мониторинга электропотреблением в режиме реального времени. Предложенные интеллектуальные технологии могут быть использованы для широкого класса аналогичных задач управления различными ресурсами и внедрены в региональные системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: интеллектуальные технологии мониторинга, припортовый электротехнический комплекс, ранговый анализ, прогноз, тренд, ситуационный центр.

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES OF MONITORING ELECTRIC CONSUMPTION OF OBJECTS OF THE TRANSPORT ELECTROTECHNICAL COMPLEX

Victor Gnatyuk

Doctor of Technical Sciences, Professor,
professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry,
Kaliningrad state technical university,
Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg Kivchun

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Telecommunications
of the Institute Physical and mathematical sciences and information technologies,
Baltic Federal University I. Kant, 236016, Kaliningrad, ul. Nevsky, d. 14.
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Abstract

The application of intellectual technologies for monitoring the electrical energy consumption of objects of dock-side electrotechnical complex, which include information technologies of management of electrical energy consumption and information technologies of processing data upon electrical energy consumption with use of computer equipment, is explored in this paper. In order to solve management task of electrical energy consumption by use of information technologies, it is offered to realize the pro-

cedure of monitoring the electrical energy consumption of objects of dock-side electrotechnical complex, which implements searching for anomalies in data, based on the rank analysis, drawing standard graphics of electrical load, forecasting, and highlighting a trend line of electrical energy consumption. The information technologies of processing data upon electrical energy consumption with use of computer equipment are represented by the situation centre of management of the electrical energy consumption of objects of dock-side electrotechnical complex, which realizes the procedure of monitoring electrical energy consumption in real-time mode. Suggested intellectual technologies can be used for a wide variety of similar tasks of management of different resources and can be implemented into local systems of support of decision making.

Key words: intellectual technologies of monitoring, dock-side electrotechnical complex, rank analysis, forecast, trend line, situation centre.

Введение

Мониторинг электропотребления объектов морских, речных, пассажирских, торговых, рыбных и др. портов является первостепенной задачей для обеспечения их бесперебойного функционирования. Выполнение данной задачи зависит от состояния припортового электротехнического комплекса (ПЭК). Под ПЭК необходимо понимать ограниченную в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель оптимального управления электропотреблением.

В рамках данной работы авторами рассматривается применение интеллектуальных технологий для мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса, которые включают в себя информационные технологии управления электропотреблением и информационные технологии обработки данных по электропотреблению с применением вычислительной техники.

Для решения задачи управления электропотреблением с помощью информационных технологий предлагается реализация расчётно-графических модулей методики мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса. Данная методика позволяет на основе рангового анализа осуществлять поиск аномалий в данных, построение типовых графиков электрической нагрузки, прогнозирование и выделение тренда электропотребления.

Задачу мониторинга электропотребления объектов ПЭК с помощью информационных технологий обработки данных по электропотреблению с применением вычислительной техники авторы предлагают решить с помощью ситуационного центра управления электропотреблением объектов ПЭК, который реализует методику мониторинга электропотреблением в режиме реального времени.

Для реализации этапов мониторинга электропотребления в ситуационном центре предлагается использовать автоматизированные рабочие места (АРМ) разработанные на основе OLAP-технологии.

1. Методика мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса

В настоящее время данные, получаемые с использованием информационно-измерительных систем (ИИС), недостаточно эффективно используются для управления электропотреблением ПЭК. Для устранения этого недостатка предлагается реализация процедур, разработанных в рамках техноценологической теории. К ним относятся: интервальное оценивание, прогнозирование, нормирование, потенцирование и факторный анализ [1].

Основоположителем техноценологической теории и создателем научных школ по данному направлению является доктор технических наук, профессор Б.И. Кудрин [2].

В работах [1-4], предложено управление электропотреблением ПЭК осуществлять в рамках методики оптимального управления техноценозом [2]. В дополнение и на основании методики управления [2] разработана методика мониторинга электропотребления объектов ПЭК, представляющая собой увязанную в единый алгоритм совокупность процедур прогнозирования, выявления аномалий в данных, построения трендов и формирования типовых графиков нагрузки (рис. 1).

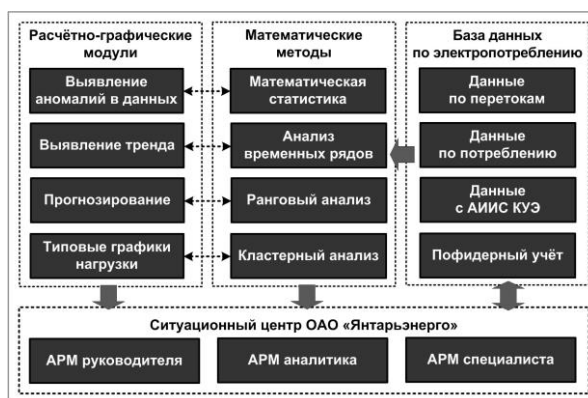


Рис. 1. Структура методики мониторинга электропотребления ПЭК

Аналитическая составляющая данной методики реализована с использованием методов техноценологического подхода [3]. Структурно методика мониторинга электропотребления ПЭК представляет собой совокупность расчётно-

графических модулей (РГМ), функционирующих в единой программно-аппаратной оболочке, в роли которой может выступать специализированная среда ситуационного центра. Каждый отдельный РГМ нацелен на решение определенных задач, при этом порядок их работы и взаимодействие могут определяться как программно, так и пользователем. По запросу пользователя из базы данных извлекается необходимая информация, передаваемая для работы в РГМ, а полученные в результате наборы данных представляются в числовом и графическом виде.

Наличие аномалий может существенным образом исказить результат обработки, однако из-за значительного объема данных их визуальный поиск с помощью графических средств в режиме



Рис. 2. Выявление аномалий в данных (фрагмент)

Применительно к объектам ПЭК прогнозирование электропотребления может осуществляться G-методами (основанными на гауссовой математической статистике), Z-методами (основанными на ципфовой математической статистике) и синтетическими GZ-методами, сочетающими достоинства тех и других методов [2]. К G-методам относится метод прогнозирования на основе алгоритма SSA (рис. 4).

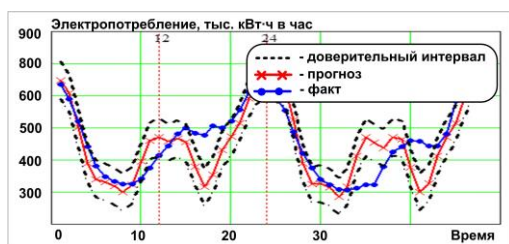


Рис. 4. Сравнение прогнозных и фактических данных (фрагмент)

Важным отличием рассматриваемых подходов от методов прогнозирования, применяемых в ИАС и, в частности, от программного комплекса «Энергостат», является возможность осуществлять прогнозирование электропотребления ПЭК на так называемых бифуркационных этапах. Под бифуркацией понимается особый момент, точка на траектории развития ПЭК, в которой устойчивое (инерционное) развитие сменяется неустойчивым состоянием. Вместо одной инерционной траектории возникает два или несколько новых путей возможного устойчивого развития. Выбор между ними определяется воздействиями со стороны систем управления как самого ПЭК, так и

ручного просмотра весьма затруднен. Программное нахождение аномалий осуществляется с использованием интерквартильного размаха и среднеквадратического отклонения (СКО). По сути, аномалии – это значения, которые располагаются далеко от центра распределения данных (рис. 2). Причинами возникновения аномалий в данных могут быть сбои в работе измерительного оборудования, нарушения технологических режимов или аварии [1].

Выявление тренда направлено на исследование в имеющемся временном ряде детерминированных составляющих. Методика выявления тренда использует алгоритм сингулярного разложения временного ряда [1] (рис. 3)

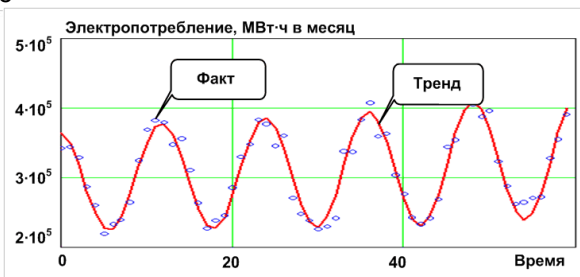
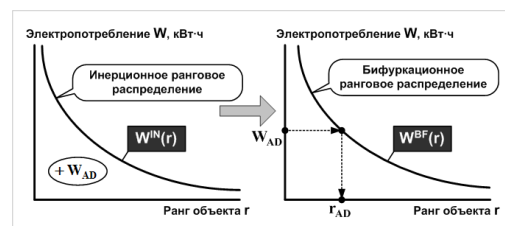


Рис. 3. Анализ тренда месячных значений (фрагмент)

внешних. После осуществления выбора механизмы саморегулирования поддерживают систему на одной из инерционных траекторий [2].

Анализ содержания методики мониторинга ПЭК [5,6] и, в частности, процедуры прогнозирования позволил заключить, что на бифуркационном этапе потребуется корректировка параметров рангового распределения [2]. Суть решаемой задачи проиллюстрирована рисунком 5.

Предположим, что бифуркация в ПЭК происходит в момент времени τ . Она является следствием внешнего управляющего воздействия и может выражаться в следующем: существенные оргштатные изменения (в т.ч. и в структуре объектов); изменение основного технологического процесса; строительство крупных потребителей электроэнергии или закрытие старых; модернизация производственных мощностей; перестройка питающей энергосистемы или другие инфраструктурные изменения; резкое снижение производства в период экономического кризиса; значительные климатические колебания, не характерные для данных физико-географических условий и др.



$W^{IN}(r)$ – инерционное ранговое параметрическое распределение;

$W^{BF}(r)$ – бифуркационное ранговое параметрическое распределение;

$+W_{AD}$ – добавочный параметрический ресурс

Рис. 5. Инерционное и бифуркационное ранговые распределения по электропотреблению

С точки зрения электропотребления, бифуркация всегда сводится к появлению в ПЭК (или убыви из него) совокупного параметрического ресурса, не являющегося «инерционным» следствием предыдущего поведения временного ряда по электропотреблению. В [6] вводятся понятия двух ранговых параметрических распределений по электропотреблению: инерционное – параметры которого определяются исключительно временным рядом предыстории развития техноценоза (в предположении, что бифуркация не происходит); бифуркационное – параметры которого, кроме предыстории, учитывают изменения в электропотреблении, происходящие в период бифуркации за счет внешнего воздействия. Получение параметров бифуркационного распределения основывается на предположении о том, что изменение величины суммарного электропотребления ПЭК, вызванного бифуркацией, существенно не повлияет на установившуюся структуру электропотребления объектов. Решение задачи получения бифуркационного распределения позволяет расширить область применения процедуры прогнозирования и дополнить другие процедуры управления электропотреблением РЭК (рис. 6), входящие в состав методики мониторинга электропотребления [2].

Результаты оценки точности прогноза на основе месячных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результат оценки точности на месячных интервалах

Параметр	БПТ		СПТ	
	11-й месяц	12-й месяц	11-й месяц	12-й месяц
sa, 10 ⁴ кВт·ч	4,4	9,2	3,8	8,2
mo, %	23,9	24,5	18,2	21,1
ss, %	8,3	9,8	7,2	8,7
so, %	9,6	10,1	8,9	9,7

Оценка точности прогноза на часовых интервалах осуществлялась по правилам оптового рынка электроэнергии по электропотреблению. На горизонте трех суток подсчитывалось количество часов, в которых относительное отклонение прогноза от факта принадлежит следующим интервалам (таблица 1): [0; 2), [2; 5), [5; 10) и более 10 %.

Построение типовых графиков нагрузок опирается на предположение, что исходная совокупность суточных графиков нагрузок делится на две группы. В первую группу входят графики, принадлежащие полноценным рабочим дням. Во вторую – входят графики, принадлежащие преимущественно выходным и праздничным дням [4]. Каждый суточный график представляется точкой (образом) в часовых координатах. Для компактного представления образов суток в пространстве меньшей размерности использовался метод главных компонент. Последующее разделение полученных образов в пространстве первых двух глав-

ных компонент осуществляется с использованием метода кластеризации «k-means». При стабилизации внутрикластерной дисперсии алгоритм метода прекращает работу и каждому образу присваивается метка принадлежности к кластеру.

Анализ данного рисунка позволяет заключить, что исходная совокупность образов не является однородной. Как представляется, данная неоднородность связана с существующими отличиями в суточных графиках нагрузки, которые наиболее явно в обобщенном виде проявились в пространстве меньшей размерности.

2. Ситуационный центр управления электропотреблением объектов ПЭК

На основе методики мониторинга электропотребления РЭК Калининградской области разработан ситуационный центр (СЦ) управления электропотреблением, основные функции которого соответствуют предложенной структуре СМЭП.

Главная сцена ситуационного центра содержит интерактивную карту с нанесенными на ней подстанциями уровня 110 / 6 кВ, воздушными линиями и отпайками, а также панель управления внешней и внутренней средой (рис. 6).



Рис. 6. Главная сцена ситуационного центра

Для реализации этапов мониторинга электропотребления в СЦ используются автоматизированные рабочие места (АРМ) аналитика, оператора и администратора, программные панели которых разработаны на основе OLAP-технологии.

При запуске процедуры «Прогнозирование» (рис. 7) на экране у оператора в виде графика и таблицы отражаются прогнозные значения, а также легенда.

Кроме того, график можно вывести на печать. В результате отображения прогноза строится доверительный интервал, с использованием которого можно уточнить заявку на оптовом рынке электроэнергии. Результаты прогноза также можно представить в табличном виде и экспортировать в формат xml.

Для выявления аномалий в данных на временной панели выбирается необходимый период поиска. Далее на вкладке «Аномалии» запускаются разработанные методы на основе интерквартильного размаха и СКО. На вкладке «Допол-

нительные методы» осуществляется построение типовых графиков нагрузки и тренда.

Кроме того, СЦ включает в себя программный модуль с функцией реализации 3D-моделирования подстанций, который предоставляет возможность существенно упростить управление объектами, а также с достаточно высокой точностью осуществить визуализацию состояния оборудования ПС в режиме реального времени.

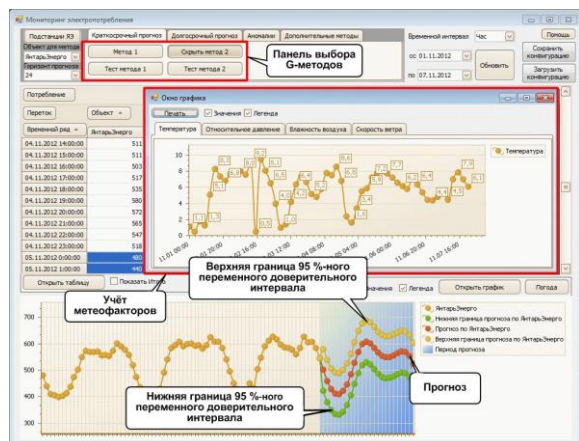


Рис. 7. Интерфейс автоматизированного рабочего места краткосрочного прогнозирования

Разработанный СЦ включает в себя модуль системы поддержки принятия решений, который позволяет осуществлять следующие функции [4]:

—оперативное управление ПЭК с использованием геоинформационных технологий, 3D-моделирования и OLAP-анализа;

—формирование предпосылок для извлечения наилучших преимуществ ПЭК при прогнозировании в соответствии с правилами оптового рынка электроэнергии;

—принятие решений по перспективной тарифной политике в интересах региона;

—разработка решений по стратегическому развитию ПЭК с учётом состояния и перспектив развития региона;

—управление ПЭК в условиях чрезвычайных ситуаций.

Заключение

Применение интеллектуальных технологий для мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса, является важной и актуальной задачей для функционирования различных видов портов.

Реализация методики мониторинга электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса в ситуационном центре позволяет повысить качество управления электропотреблением, существенно уточнить процедуры прогнозирования электропотребления, снизить затраты на сверхнормативные отклонения по электропотреблению и сформировать алгоритмы управления на бифуркационных этапах.

Литература

1. Васильев В.Н. и др. Управление электропотреблением муниципального образования на основе новых информационных технологий // Сборник материалов X юбилейной МНК «Инновации в науке и образовании». – Калининград: КГТУ, 2012. С. 455-458.
2. Гнатюк В.И., Луценко Д.В., Кивчун О.Р. и др. Фрактальное параметрическое распределение техноценоза на бифуркационном этапе развития // Механизация строительства. – 2014. – № 10. – с. 44-47.
3. Гнатюк В.И., Луценко Д.В., Кивчун О.Р., Васильев В.Н. Методика мониторинга электропотребления электротехнического комплекса Калининградской области // Промышленная энергетика. – 2015. – № 3. – с. 26-35.
4. Гнатюк В.И., Никитин М. А., Луценко Д.В., Кивчун О.Р. Модели и методы прогнозирования электропотребления при управлении объектами регионального электротехнического комплекса // Математическое моделирование. – М.: – 2017. – № 29:5. – с.109-121.

References

1. Vasil'ev V.N. i dr. Upravlenie ehlektropotrebleniem municipal'nogo obrazovaniya na osnove novykh informacionnyh tekhnologij. Sbornik materialov X yubilejnoj MNK «Innovacii v nauke i obrazovanii». Kaliningrad: KGTU, 2012. S. 455-458.
2. Gnatyuk V.I., Lucenko D.V., Kivchun O.R. i dr. Fral'cov. Rangovoe parametricheskoe raspre-delenie tekhnocenoza na bifurkacionnom ehtape razvitiya. Mekhanizaciya stroitel'stva, 2014, № 10, c. 44-47.
3. Gnatyuk V.I., Lucenko D.V., Kivchun O.R., Vasil'ev V.N. Metodika monitoringa ehlektropo-trebleniya ehlektrotekhnicheskogo kompleksa Kaliningradskoj oblasti. Promyshlennaya ehnergetika, 2015, № 3, c. 26-35.
4. Gnatyuk V.I., Nikitin M. A., Lucenko D.V., Kivchun O.R. Modeli i metody prognozirovaniya ehlektropotrebleniya pri upravlenii ob"ektami regional'nogo ehlektrotekhnicheskogo kompleksa. Matematicheskoe modelirovanie. M., 2017, № 29:5, s.109-121.

УДК 629.12.001.2

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ И СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

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

Александр Алексеевич Меркулов

начальник технопарка КГТУ
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

Абдурашид Яруллаевич Яфасов

доктор технических наук, профессор, начальник управления инновационной деятельности
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: abdurashid.yafasov@klgtu.ru

Аннотация

Предложена технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных инфраструктурных объектов. Выделены в отдельный класс приморские территории, вследствие взаимосвязанности природных и техногенных процессов в системе: Морская акватория – Приморская территория. Отмечается, что в информационных технологиях наиболее важную роль в стратегической перспективе и глобальных масштабах играют два основных направления развития: Интернет и Ситуационные центры, до сих пор развивавшихся без тесной взаимосвязи. Первый представляет собой классическую схему информационных технологий с использованием распределенной архитектуры, второй – классическую локальную схему решения эргатических систем управления. Совмещение этих двух стремительно развивающихся направлений информационных технологий в виде распределенных интеллектуальных систем управления обеспечит синергетический эффект устойчивого развития территорий и сложных инфраструктурных объектов. Оно даст новое качество управлению как внутри предприятия, организации, территорий, так и взаимоотношению между ними и приведет к существенному снижению затрат на управленческую и производственную логику. Предложенная технология может быть использована в MariNet и других треках Национальной технологической инициативы в целях успешной реализации Стратегии научно-технологического развития России.

Ключевые слова: устойчивое развитие, ситуационный центр, гибридный паттерн, распределенная система управления, MariNet, прибрежная инфраструктура, эргатические системы.

SYNTHESIS TECHNOLOGY OF DISTRIBUTED INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS AS A TOOL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE TERRITORIES AND COMPLEX OBJECTS

Natalia Kostrikova.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Vice-rector for research
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: natalia.kostrikova@klgtu.ru

Alexander Merkulov.

Head of Technopark of Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

Abdurashid Yafasov.

Doctor of technical Sciences, Professor, Head of Department of innovation activities
Kaliningrad State Technical University

236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1
e-mail: abdurashid.yafasov@klgtu.ru

Abstract

The technology of synthesis of distributed intelligent control systems as a tool for sustainable development of the territories and complex infrastructure. A separate class of seaside territory, due to the interconnectedness of natural and technogenic processes on the system: marine waters-the seaside territory. It is noted that the information technologies the most important role in strategic perspective and global scales played two main directions of development: the Internet and Situation centers still developed without a close relationship. The first is a classic scheme of information technology by using a distributed architecture, the second is a classic local schema solutions ergonomics management systems. The combination of these two rapidly growing areas of information technology in the form of distributed intelligent control systems will provide synergies for sustainable development of the territories and the complex infrastructure facilities. It will give a new quality management both inside the enterprise, organization, territory, and the relationship between them and lead to a significant decrease times the cost of management and production logistics. The offered technology can be used in the MariNet and other tracks of the national technological initiatives for the successful implementation of the strategy of scientific and technological development of Russia.

Keywords: sustainable development, situation center, hybrid pattern, distributed control system, MariNet, coastal infrastructure, ergatic systems.

Введение

Устойчивое развитие территорий, нашедшее отражение в Декларации 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН в сентябре 2015 года [1], представляет собой задачу, сложность которой нарастает, начиная с масштабов отдельных муниципалитетов и областей и заканчивая масштабами государств, макрорегионов, мирового хозяйства в целом по очевидной причине: фундаментальные процессы в природе, экономике и социальной среде взаимосвязаны. Среди таких объектов организации и управления жизнедеятельностью следует выделить в отдельный класс приморские территории, вследствие взаимосвязанности природных и техногенных процессов в системе: Морская акватория – Приморская территория.

Выделение их в отдельный объект рассмотрения обусловлено императивом комплексного планирования и управления жизнедеятельностью на прибрежных территориях в логике единого рассмотрения процессов, протекающих здесь с процессами на море.

Так как природа в этом плане приносит в последние годы множество примеров, актуализирующих сформулированный тезис, рассмотрим техногенную сферу. В качестве типичных примеров в техногенной сфере можно привести две крупнейшие катастрофы последнего десятилетия: аварии на нефтедобывающей платформе компании British Petroleum в 2010 г и на АЭС в Фукусиме в 2011 г. [2,3] В первом случае несовершенство планирования и обеспечения безопасности производства в Океане привело к аварии на буровой и гигантскому разливу нефти, вызвавшему масштабные последствия в прибрежных территориях на протяжении многих сотен миль, экономический ущерб специальной комиссией Конгресса США оценен в \$54 млрд, изменилась социальная картина прибрежных территорий на несколько лет. Во втором случае несовершенство планирования и обеспечения производства на приморской территории привело к аварии на АЭС и радиоактивному загрязнению вод Океана и полному пересмотру государственной политики Японии и ряда других ведущих западных стран на пути развития энергетики. В обоих случаях нет сомнений в

компетенциях специалистов Великобритании и Японии – ведущих стран в мире в техническом и технологическом плане. Но не соблюдался принцип единого рассмотрения процессов в системе Морская акватория – Приморская территория, не были достаточно полно рассмотрены взаимообусловленность природных и техногенных процессов приморских территорий и морской среды. Общий экономический эффект от этих двух аварий превысил \$200 млрд.

Другой пример: Янтарный комбинат, расположенный в Калининградской области Российской Федерации на берегу Балтийского моря, сбрасывающий многие десятилетия отработанную породу в виде пульпы из воды, песка и «голубой глины» объемом до миллиона кубометров в море, платил и платит огромные штрафы за «загрязнение окружающей среды». Прибрежными водными течениями этот песок и «голубая глина» разносится по побережью, поддерживая экологическое равновесие на пляжах Южной Балтики, вследствие мелководности прибрежной территории в районе Калининградского (Самбийского) полуострова. Пульпа представляет собой раствор веществ среды обитания янтаря-сукцинита с территории прибрежной береговой полосы, которая имеет прямые открытые выходы к морю как в наземной, так и в подводной части побережья. То есть с точки зрения экологии составы отходов Янтарного комбината и дна Балтийского моря близки друг к другу. Поэтому сложно утверждать о «загрязнении морской среды», этот вопрос требует детальных исследований. Парадокс в другом: снижение сброса пульпы и изменение технологического регламента добычи янтаря может привести к потере пляжей, песок из которых вымывается в зимний период штормами в море, то есть, нарушить экологию прибрежной полосы Балтийского моря в районе Калининградского полуострова. Россия ежегодно тратит десятки миллионов рублей на восстановление пляжей, на укрепление береговой полосы Калининградской области, часть из которых можно было бы сэкономить за счет научно обоснованного подхода к организации хозяйственной деятельности в прибрежной полосе.

Два приведенных разномасштабных примера показывают взаимосвязь парадигмы устойчивого развития с императивом планирования и управления жизнедеятельности на прибрежных территориях в парадигме Морская акватория – Приморская территория. Наиболее актуальной эта проблема является для приморских территорий, исторически густонаселенных, в частности – Балтийского моря, одного из самых загрязненных морей на Земле, вокруг которого проживает почти треть населения и производится треть ВВП Европы. В Стратегии Европейского Союза для региона Балтийского моря отмечается, что он может рассматриваться как «модельный регион для развития региональной кооперации, где могут быть апробированы новые идеи и подходы, которые со временем могут стать образцами лучшей европейской практики» для достижения устойчивого развития.

Рассмотрение систем управления прибрежными территориями и инфраструктурными объектами в таких контекстах позволяют дать новый вектор развития системы современного регионального и производственного менеджмента в условиях неизбежного перехода к цифровой экономике. При этом возникает потребность распределенного взаимодействия и нового инструментария его обеспечения – распределенной интеллектуальной системы управления (РИСУ), в узлах которой, как будет показано далее с учетом сложности системы, должны находиться интеллектуальные системы класса Ситуационных центров (СЦ).

Распределенные интеллектуальные системы управления

Несмотря на то, что с начала XXI века развитие технологий и технических средств интеллектуализации систем управления объектами и территориями идет по экспоненте, их эффективность, по мнению авторов, существенно страдает, т.к. развитие интернета и развитие систем управления класса ситуационный центр (СЦ) идут самостоятельными курсами.

Самое первое решение, которое, по сути, предвосхищало и совмещало в себе современный интернет и СЦ предложил в 1959 году советский ученый Китов А.И. [4], которое, к сожалению, было отвергнуто.

В 1962 году Американское агентство исследовательских проектов Министерства обороны США (Advanced Research Projects Agency of the U.S. Department of Defense, ARPA) открыло проект, который позднее получил название ARPANET [5] который превратился за последние 55 лет в современный интернет с такими достижениями, как социальные сети и интернет вещей.

В 1971 году в Чили был начат весьма перспективный комплексный проект под руководством С. Бира [6] – ситуационный центр с функциями интернета, однако в 1973 году, после свержения президента страны С. Альенде и прихода к власти военной хунты, все программные и технические решения были уничтожены. Можно считать, что с этого времени ситуационные центры и интернет развивались самостоятельно.

Однако, парадигма цифровой экономики ставит неизбежной проблему совмещения этих двух треков

– проблему весьма интересную, так как, по сути, в предельных случаях Ситуационный центр Минэкономразвития можно рассматривать как некий аналог Госплана СССР, но уже на новом уровне, а Интернет – отражение неолиберальной рыночной экономики. Но сегодня Интернет не является полностью свободной и доступной равной средой для всех и является отражением монополярного видения мира. То есть, изначально децентрализованный Интернет, тем не менее, управляется из одной точки, куда стекается вся мировая информация и откуда могут приниматься управленческие решения. Для того чтобы Интернет стал объективно равноудаленным от центров принятия управленческих решений, он должен развиваться в технологии распределенного реестра [7], но разные страны по-разному к этому готовы или не готовы вовсе.

Сегодня для распределенных организационных структур с преобладающим участием людей мы имеем, с одной стороны, такие уникальные централизованные системы, как национальный центр управления обороной РФ, а с другой, социальные сети, которые объединяют децентрализованных индивидуальных пользователей.

Для территориально распределенных технических устройств развиваются распределенные системы управления (PCU, DCS- Distributed Control System), которые состоят из множества разнесенных в пространстве независимых устройств, взаимодействующих для выполнения общей задачи [8]. В 2015 году впервые опубликован международный стандарт IEC 61499 [9] – открытый стандарт распределенных систем управления и автоматизации.

Возникает потребность распределенного взаимодействия и распределенной системы управления, в узлах которой бы находились интеллектуальные системы класса СЦ. Решение подобной задачи и массовое использование в экономике требует снижения цены СЦ на порядки, сохранение формата взаимодействия социальных сетей и расширение стандарта IEC 61499 структурообразующим контентом на основе модели хранения данных «Категории сущностей и связей» [10] (KCC). В этом случае возможен полномасштабный переход к эффективной цифровой экономике.

По мнению авторов решать эту задачу надо не путем сближения этих концепций, а «сверху»: путем синтеза распределенных интеллектуальных систем управления – РИСУ.

Наиболее сложной частью для автоматизации и тиражирования является согласование взаимодействия разработчиков концептуальных моделей, инструментальных средств, специалистов предметных областей и пользователей [10,12-15].

Технология синтеза РИСУ

РИСУ включают в себя неопределенное количество центров принятия решений (ЦПР), которые могут быть как равноправными, так и иметь выделенные центры управления. Такая конфигурация возможна при условии, что каждый ЦПР имеет интеллектуальную систему управления, способную взять на себя решение задач в трех режимах: самостоятельный, подчиненный и управление всей системой.

Данное решение предполагает быстрый синтез рабочих мест ситуационных центров для использования как внутри организации, так и внешней координации.

За основу берется модель КСС, использованная для одной организационной структуры [14]. Общая архитектура СЦ представлена на рис. 1.

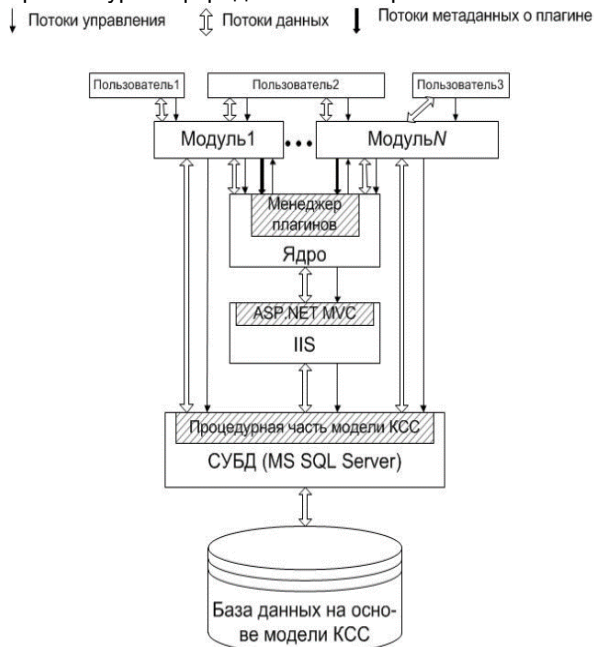


Рис. 1. Схема архитектуры для единичного СЦ

Особенность данного подхода заключается в том, что на мониторе экрана видны изучаемый предмет и детальная информация о нем одновременно. Целостная картина представлена как правило графическими образами, а пояснения символическими полями.

Собрать подобную картину не представляет сложности. Однако в процессе работы возникает потребность в большом количестве сценариев и быстром изменении их без программирования. Данная процедура возможна, если в программном комплексе есть взаимосвязь между базой данных, средним слоем, интерфейсом и возможностью быстро перенастраивать все эти слои между собой.

Синхронизация интерфейса со всеми слоями обеспечивается с помощью классификаторов и справочников для уровня базы данных и событий для среднего уровня.

В интерфейсе выделено шесть системных уровней, которые оформлены в виде динамических областей, которые может настраивать без программирования: рабочее пространство ситуационного центра, рабочее место, конфигурация, контейнер, виджет, контрол, рисунок 2.

Рабочее пространство ситуационного центра состоит из множества рабочих мест. Рабочее место определяется с помощью логина и пароля, предоставляемых пользователю. Рабочее место состоит из множества конфигураций, которые определяют отдельные функциональные и предметные задачи специалиста. Конфигурация представлена контейнерами, которые определяют топологию экрана и служат для размещения в них и отображения виджетов. В контейнере может находиться множество

виджетов, представляющих собой законченное решение отдельной конкретной функции, выраженной в графической форме. Каждый виджет состоит из множества контролов (типовой элемент интерфейса), которые позволяют осуществить тонкую настройку.

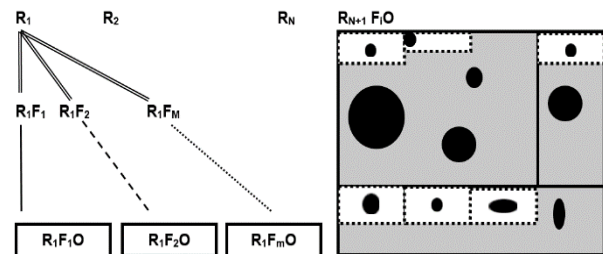


Рис. 2. Общая схема рабочих мест (R_i), конфигураций ($R_i F_j$), «пустых контейнеров» ($R_i F_j O$), настраиваемых контейнеров (■), различных виджетов (□), различных контролов (●)

Архитектура СЦ (рис. 1) и схема интерфейса (рис. 2) реализована в рамках одной событийной схемы среднего слоя и одной базы данных.

Существующие подходы [10] и стандарты [11] по распределенным системам управления рассчитаны на сети, в узлах которых находятся технические устройства и программное обеспечение. И в них не рассматривается случай, когда узлом является организационная структура, управляемая ситуационным центром. Ключевое отличие таких «узлов», в том, что помимо формализованных параметров в них существуют [12] такие свойства как уникальность, отсутствие формализованной цели существования, отсутствие оптимальности, динамичность, неполнота информации и наличие свободы воли. Наличие таких свойств делает невозможным использование в полном объеме подходов принятых в АСУТП, АСУП, РСУ и других подходов, где объект управления более предсказуем.

Для планирования и управления жизнедеятельностью на прибрежных территориях в контексте Морская акватория – Приморская территория наиболее подходят распределенные системы, в узлах которых ситуационные центры, отражающие в реальном масштабе времени ситуации на судах, морских производственных платформах, береговых объектах, природные условия и т.д.

Для организации взаимодействия различных СЦ необходимо в первую очередь обеспечить единообразную систему сбора, структуру хранения и обработки данных, а также возможность передавать эти данные из одного рабочего пространства в другое, сохраняя при этом возможность принятия решений за человеком в виде единого эргатического организма.

Лучшим решением в этом плане является использование модели хранения данных «Категории сущностей и связей» (КСС) [14]. Однако взаимодействие различных ситуационных центров потребует создание специальных рабочих мест, состоящих из данных, структур данных, элементов (конфигураций, контейнеров, виджетов, контролов), которые относятся к различным рабочим пространствам, которые взаимодействуют с различным контентом, рисунок 3.

Формирование такого интерфейса вручную невозможно, для этого необходимо использовать

технологии синтеза рабочих мест [12] уникального ситуационного центра, таблица 1.

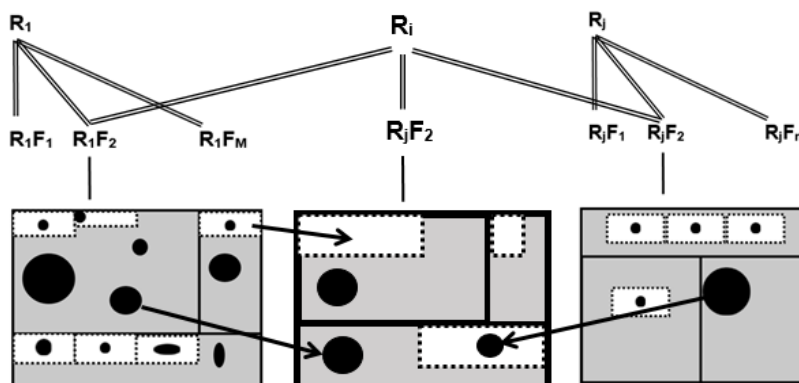


Рис. 3. Схема формирования «Распределенного рабочего места»

Табл. 1.Схема технологии синтеза ситуационного центра и его рабочих мест

<div>↑</div> <div>Инструментальная ось</div>	Символы	A4 Менеджер контента. Структуро образующий контент	B4 CQ VSM Cenose. Контент абстрактной области	C4 Типовой CQ. Контент типовой предметной области.	D4 Уникальный ситуационный центр
	Интерфейс	A3 Менеджер интерфейса. Конфигурации, контейнеры, виджеты.	B3 Визонариум VSM Cenose. Визуальные паттерны внутренней и внешней среды организации	C3 Типовой визонариум. Типовые модели внутренней и внешней среды. Модель связи со сторонними разработками.	D3 Рабочие места пользователей Уникальные конфигурации, контейнеры и виджеты. .
	Средний слой	A2 Менеджер плагинов. Плагины, ASP.Net, MVC, IIS, ядро. Модель связи с БД	B2 Менеджер плагинов VSM Cenose. Объектная модель среднего слоя. Архитектура VSMA	C2 Менеджер плагинов для типового проекта. Типовые плагины. Модель связи с внешними устройствами и сервисами	D2 PM для среднего слоя уникальной организации. Уникальные плагины.
	СУБД	A1 Схема DBO. Таблицы, скрипты, функции, триггеры, представления.	B1 БД VSM Cenose. (entities, enums, org) Модель шлюза с внешними данными	C1 База данных на типовой проект. Типовые схемы, скрипты, функции, представления	D1 Уникальная база данных. Уникальные схемы, скрипты, функции.
		A. Модель данных KCC Метамодель	B. Паттерн VSM Cenose Абстрактная модель	C. Типовой проект Конкретная модель	D. Модель организации Уникальная модель
<div>Концептуальная ось</div> <div>→</div>					

В квадрате A1 - B2 у нас находится структурно – абстрактное ядро, которое охватывает уровень метамодели и абстрактной модели на уровне базы данных и среднего слоя. Ядро не зависит от предмета автоматизации. Квадрат C3 - B4 представляет собой предметно - конкретную область, которая описывается на языке спецификаций для экспертов и языке конкретных данных для пользователей. Наличие и взаимосвязь таких решений, позволяет с одной стороны тиражировать, а с другой – обеспечить взаимосвязь различных ситуационных центров, что и служит основой интеллектуальных распределенных систем управления прибрежных территорий и инфраструктурных объектов. Ниже представлен один из вариантов интерфейса распределенной системы управления, рисунок 4.

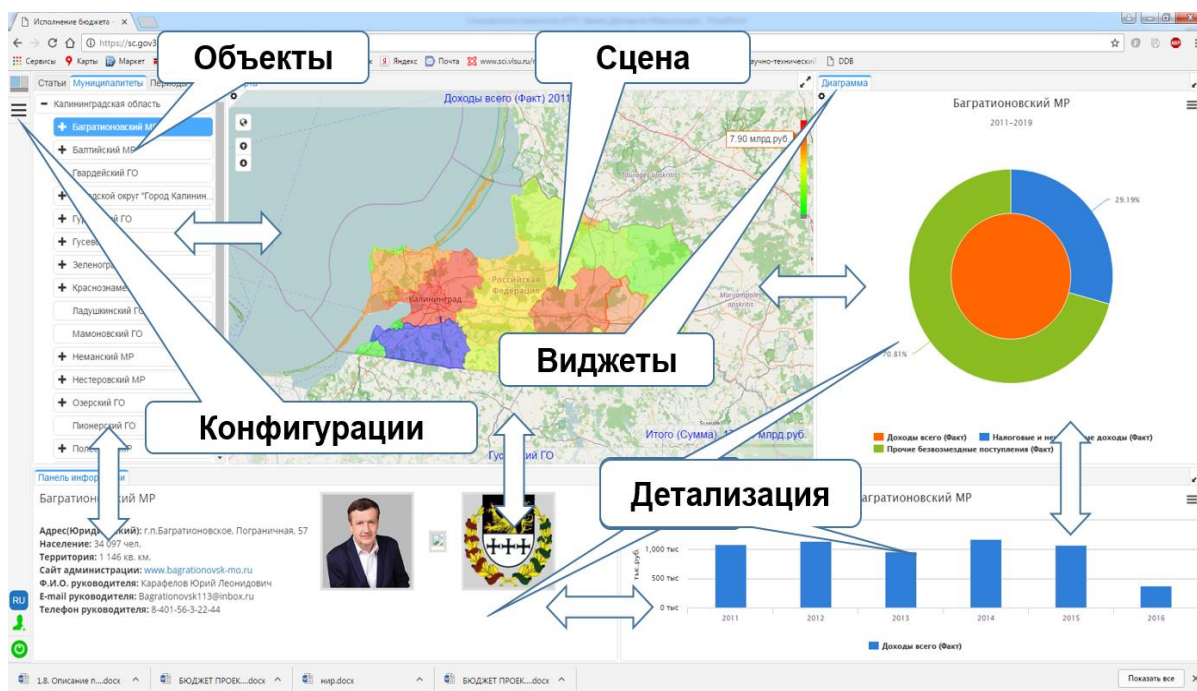


Рис. 4. Пример интерфейса [13]

Рассмотренная технология апробирована в министерстве финансов Калининградской области, подготовлены проекты её внедрения в ряд приморских муниципалитетов Калининградской области.

Заключение

В стратегической перспективе в информационных технологиях, в цифровой экономике наиболее важную роль будет играть гармоничное развитие двух основных направлений: Интернета и Ситуационных центров, способных обеспечить преимущества распределенной архитектуры с решением эргатических систем управления.

**Работа выполнена в рамках гранта
" Развитие НТИ -II", договор номер:151ГРНТИС5/35877 от 21.07.2017,
тема «Распределенная интеллектуальная система управления прибрежными инфраструктурными объектами и территориями на основе технологий ситуационных центров».**

Предложенная технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления может стать эффективным подходом к созданию IT-инструментов устойчивого развития территорий и сложных инфраструктурных объектов. Она может быть использована в треках Национальной технологической инициативы в целях успешной реализации Стратегии научно-технологического развития России.

Литература

1. Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 25 сентября 2015 года. 70/1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. 44 с. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/92/PDF/N1529192.pdf>
2. Deep Water The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling. Report to the President. National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling. USA, Washington, January 2011, 398 p.
3. Mycle Schneider, Antony Froggat, Yurika Ayukawa et al. The World Nuclear Industry Status Report, Paris, London, Washington, D.C., July 2014, 159 p.
4. Долгов В.А. Китов Анатолий Иванович – пионер кибернетики, информатики и автоматизированных систем управления: Научно-биографический очерк/Под общей редакцией К.И. Курбакова.– М.: КОС•ИНФ, 2010.337 с.,
5. Бир С. Мозг фирмы. М. Радио и связь, 1993.416 с.
6. Прохоров А. От ARPAnet до INTERNet (краткая история Интернета). <http://compress.ru/article.aspx?id=9708>

7. Distributed ledger technology: Blackett review. <https://www.gov.uk/government/publications/distributed-ledger-technology-blackett-review>
8. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M. A multi-layer architecture for distributed data acquisition. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002, vol. 2, 2002, p. 1261 - 1264.
9. IEC 61499 The New Standard in Automation: Tools, <http://www.iec61499.com/tools.htm>
10. Дмитриевский В.А., Майтаков Ф. Г., Меркулов А. А. Модель данных "Категории сущностей и связей". Калининград : БФУ им. Канта, 2014. 84 с.
11. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. 288 с.
12. Колесников А.В., Меркулов А.А., Майтаков Ф.Г., Петренко Е.В. Синтез рабочих мест виртуальных гетерогенных коллективов на основе технологий ситуационных центров и WEB 4.0. / Третья Всероссийская Поспеловская конференция с международным участием "Гибридные и синергетические интеллектуальные системы". Россия, Светлогорск, 6-11 июня 2016 года
13. Kostrikova N.A., Yafasov A.Ya. Intellectual Organization in the New Model of the Russian Marine Industry Development / TransNav (the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation), Vol. 8, № 2, pp. 267-272, 2014.
14. Меркулов А.А., Яфасов А.Я., Кошелева И.Л., Петренко Е.В. «Универсальный виртуальный ситуационный центр «Муниципалитет». Москва: Роспатент, Свидетельство № 2013661281 от 05.12.2013г.
15. Волкогон В.А., Кострикова Н.А., Меркулов А.А., Яфасов А., Я. Информационно аналитический центр «Маринет 2.0». Москва: Роспатент, св.№ 2016612834 от 10 марта 2016г.

References

1. Rezolyutsiya, prinyataya General'noy Assambleey 25 sentyabrya 2015 goda. 70/1. Preobrazovanie nashego mira: Povestka dnya v oblasti ustoychivogo razvitiya na period do 2030 goda. 44 s. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/92/PDF/N1529192.pdf>
2. Deep Water The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling. Report to the President. National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling. USA, Washington, January 2011, 398 r.
3. Mycle Schneider, Antony Froggat, Yurika Ayukawa et al. The World Nuclear Industry Status Report, Paris, London, Washington, D.C., July 2014, 159 p.
4. Dolgov V.A. Kitov Anatoliy Ivanovich – pioner kibernetiki, informatiki i avtomatizirovannykh sistem upravleniya: Nauchno-biograficheskiy ocherk/Pod obshchey redaktsiei K.I. Kurbakova.– М.: KOS•INF, 2010.337 s.,
5. Bir S. Mozh firmi. M. Radio i svyaz', 1993.416 s.
6. Prokhorov A. Ot ARPAnet do INTERNet (kratkaya istoriya Interneta). <http://compress.ru/article.aspx?id=9708>
7. Distributed ledger technology: Blackett review. <https://www.gov.uk/government/publications/distributed-ledger-technology-blackett-review>
8. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M. A multi-layer architecture for distributed data acquisition. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002, vol. 2, 2002, p. 1261 - 1264.
9. IEC 61499 The New Standard in Automation: Tools, <http://www.iec61499.com/tools.htm>
10. Dmitrovskiy V.A., Maytakov F. G., Merkulov A. A. Model' dannykh "Kategorii sushchnostey i svyazey". Калининград : БФУ им. Канта, 2014. 84 с.
11. Pospelov D. A. SituatSIONnoe upravlenie: teoriya i praktika. – М.: Nauka, 1986. 288 s
12. Kolesnikov A.V., Merkulov A.A., Maytakov F.G., Petrenko E.V. Sintez rabochikh mest virtual'nykh geterogennykh kollektivov na osnove tekhnologiy situatsionnykh tsentrov i WEB 4.0. / Tret'ya Vserossiyskaya Pospelovskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy". Rossiya, Svetlogorsk, 6-11 iyunya 2016 goda
13. Kostrikova N.A., Yafasov A.Ya. Intellectual Organization in the New Model of the Russian Marine Industry Development / TransNav (the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation), Vol. 8, № 2, pp. 267-272, 2014.
14. Merkulov A.A., Yafasov A.Ya., Kosheleva I.L., Petrenko E.V. «Universal'nyy virtual'nyy situatsionnyy tsentr «Munitsipalitet». Moskva: Rospatent, Svidetel'stvo № 2013661281 ot 05.12.2013g.
15. Volkogon V.A., Kostrikova N.A., Merkulov A.A., Yafasov A., Ya. Informatsionno analiticheskiy tsentr «Marinet 2.0». Moskva: Rospatent, sv.№ 2016612834 ot 10 marta 2016g.

УДК 658.262; 658.512:005

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИПОРТОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В РАМКАХ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Виктор Иванович Гнатюк

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики,
Калининградский государственный технический университет
236022, г. Калининград, Советский проспект, д. 1.
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Олег Романович Кивчун

кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций института
физико-математических наук и информационных технологий,
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236016, г. Калининград, ул. Невского, д. 14.
e-mail: oleg_kivchun@mail.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

В контексте интеллектуальных энергетических систем и «IoT» рассмотрены новые подходы развития и управления распределенной генерации различной вариативной мощности с использованием активно-адаптивных электрических сетей, систем автоматического управления генерирующими предприятиями, электрическими подстанциями, потребителями припортового электроэнергетического комплекса. С учетом нарастания роли распределенной генерации развитием офшорных электростанций в электроэнергетике будущего, аккумуляции и перетоков электроэнергии между потребителями и поставщиками по новому актуализируется проблема оптимального и эффективного использования электроэнергии в приморских регионах. Для решения данной проблемы в статье предлагается научно-обоснованный подход определения потенциала энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса с помощью процедуры потенширования. Под потеншированием понимается процедура оптимального управления электроэнергией, заключающаяся в определении интегрального количества ресурса, на величину которого на данном временном интервале должно быть сокращено электропотребление объектов припортового электротехнического комплекса без нарушения их нормального функционирования. Данный подход предлагается реализовать на первом шаге интеллектуализации приморской электроэнергетики в рамках проекта «Цифровой район электрической сети АО «Янтарьэнерго»».

Ключевые слова: потенциал энергосбережения, интеллектуальные энергетические системы, припортовый электротехнический комплекс, оптимальное управление электропотреблением, приморские территории.

DETERMINATION OF CAPACITY OF ENERGY SAVING OF OBJECTS THE TRANSPORT ELECTROTECHNICAL COMPLEX WITHIN THE FRAMEWORK OF THE DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL ENERGY SYSTEMS

Victor Gnatyuk

Doctor of Technical Sciences, Professor,
professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry,
Kaliningrad state technical university,
Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Oleg Kivchun

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Telecommunications
of the Institute Physical and mathematical sciences and information technologies,
Baltic Federal University I. Kant, 236016, Kaliningrad, ul. Nevsky, d. 14.
e-mail: oleg_kivchun@mail.ru

Abdurashid Yafasov

Doctor of technical sciences, professor,
head of innovation activity department,
Kaliningrad state technical university,
Sovetskiy Prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: mail@gnatukvi.ru

Abstract

In the context of intellectual power systems and «IoT» new approaches of development and management of distributed generation of different variant power with the use of actively adaptive electrical networks and systems of automatic control of generative enterprises, of electrical substations and of consumers of dock-side electrical power complex are examined. Taking into account the growth of the role of distributed generation due to the development of offshore electrical power stations in electricity industry in the future, accumulation and overflows of electrical power between consumers and providers, the problem of the optimal and effective use of electrical energy in the seaside regions is becoming topical in a new way. In order to solve this problem a scientifically reasonable approach of determining the potential of electrical energy saving of the objects of the dock-side electrotechnical complex is offered in this article with the use of procedure of potensiation. The potensiation is considered to be the procedure of optimal management of electrical energy power which lies in determining the integral quantity of the resource upon size of which the electrical energy consumption of the objects of portside electrotechnical complex should be reduced during this time interval without interfering into their normal operation. It is offered to realize this approach at the first stage of the intellectualization of the seaside electrical energy industry within the confines of the project "Digital area of electrical network AO «Yantarengo».

Key words: potential of energy saving, intellectual energy systems, dock-side electrotechnical complex, optimal management of electrical energy consumption, seaside area.

Введение

Электроэнергетика относится к одной из самых динамически развивающихся областей современной отцифровываемой экономики 6-го технологического уклада с ключевых точек зрения интеллектуализации и диверсификации энергетических систем: генерации, аккумулирования, распределения и потребления имея в виду, в первую очередь, использование возобновляемых источников энергии. Инвестиции в возобновляемые источники энергии в последние пять лет, по данным агентства «Bloomberg» примерно вдвое превышают инвестиции в добычу ископаемого топлива, и это дает хорошие результаты по наращиванию установленных мощностей ветровых и солнечных электростанций (рис.1 и 2) [1].

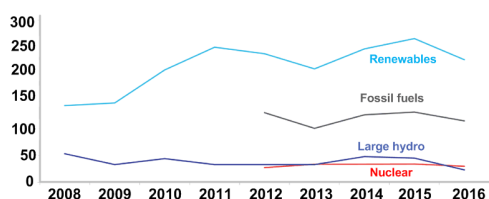


Рис. 1. Инвестиции в мощности энергетики

Их успешное развитие за последнее десятилетие является реальным воплощением парадигмы устойчивого развития, принятой на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в

июне 1992 года в г. Рио-де-Жанейро на уровне глав государств и правительств. Однако необходимо отметить другой принципиально важный новый момент. Ветровые и солнечные электростанции меняют подходы и формируют новые технологии развития и управления распределенной генерации различной вариативной мощности с использованием активно-адаптивных электрических сетей, систем автоматического управления генерирующими предприятиями, электрическими подстанциями, потребителями и т.д.

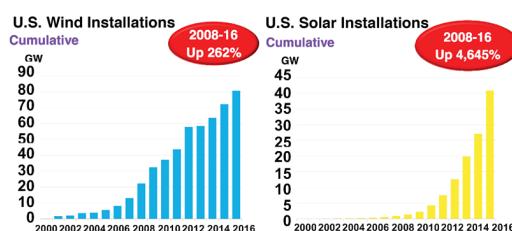


Рис. 2. Динамика роста установленной мощности ветровых и солнечных электростанций

Ветровые и солнечные электростанции меняют подходы и формируют новые технологии развития и управления распределенной генерации различной вариативной мощности с использованием активно-адаптивных электрических сетей, систем автоматического управления генерирующими предприятиями, электрическими подстан-

циями, потребителями и т.д. Их широкое распространение актуализирует проблемы распределенной генерации. Но множество индивидуальных производителей электроэнергии для своих нужд нуждаются в электроэнергии, поставляемой в соответствии со своими технологическими, производственными или бытовыми процессами, не всегда совпадающими с возможностями собственных генерирующих электрических мощностей. Для них должна иметься возможность свободного обмена электроэнергией с распределенной сетью, звеньями которой они являются.

Таким образом, производственные и потребительские сервисы должны быть связаны в единой технологической сети производства, хранения и потребления электроэнергии и управляться из единого ситуационного центра, либо синхронизировать свою работу с помощью неё. При этом следует отметить, что аккумулирующие мощности не только производителей, но и потребителей смогут включаться для хранения и поставки электроэнергии. То есть вместе с распределенной сетью электрогенерации параллельно возникает распределенная сеть не только потребления, но и хранения электроэнергии. Например, для такого среднего областного центра – города Калининграда, объем потенциально запасаемой только автомобилистами в распределенной «сети хранения» электроэнергии составляет примерно $350000 \times 55 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 20 \text{ млн. кВт} \cdot \text{ч}$.

Для приморских регионов особое значение приобретает развитие офшорной энергетики. Анализ, проведенный учеными Калининградского технического университета, показал, что потенциал ветроэнергетики российского анклава составляет примерно 300 МВт, что превышает треть реальной потребности с учетом пиковых нагрузок в последние 10 лет. Анализ, выполненный американскими экологами, дал другой, не менее интересный результат: потенциал офшорной энергетики по десяти штатам Восточного побережья США в 2,3 раза превышает разведанные запасы нефти и газа на шельфе. Отсюда следует, что офшорная ветроэнергетика становится глобальным направлением развития приморских территорий. Весьма заманчивым это направление может стать при освоении ресурсов Арктики. При этом реализация сетевых распределенных систем энергетики с использованием ИТ-технологий (Smart Technology) становится одним из самых привлекательных секторов цифровой экономики для стратегических инвестиций как государств, так и бизнеса.

В Дорожной карте «EnergyNet» национальной технологической инициативы одним из направлений развития отечественной электроэнергетики является развитие сервисов интеллектуальных энергетических систем, в частности, микроэнергосистем (промплощадки, порты, выделенные территории и отдельные районы городов) в контексте интеллектуальной распределенной электроэнергетики и «IoT». В рамках НТИ «EnergyNet» в Калининградской области начата

реализация проекта «Цифровой район электрической сети – АО «Янтарьэнерго»», который позволит существенно снизить потери в сетях и обеспечить снижение затрат на их эксплуатацию.

В данной работе авторы рассматривают пути повышения оптимального использования электроэнергии и определения потенциала энергосбережения для объектов припортового электроэнергетического комплекса в рамках использования интеллектуальных энергетических систем. Результаты работы могут дать мультипликативный эффект при переходе в дальнейшем к распределенным сетевым энергосистемам.

1. Потенширование как процедура оптимального управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса

Как известно из работ [1 – 4], основными процедурами методики оптимального управления электропотреблением объектов ПЭК являются следующие: формирование базы данных [2], интервальное оценивание [1, 2], прогнозирование [1, 2] и нормирование [8]. Предлагается дополнить их еще одной ключевой процедурой – потенцированием [3, 4] (слово – от английского «potential» – «потеншл») (рис. 3).

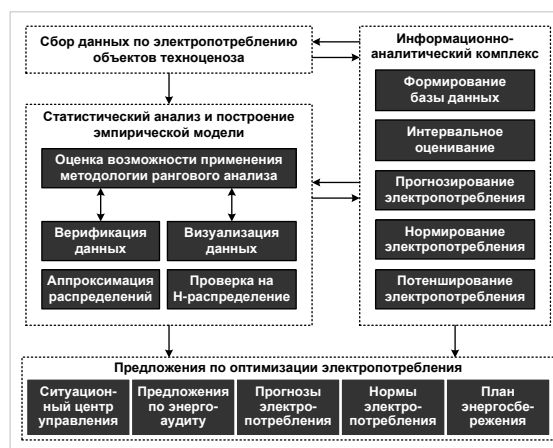


Рис. 3. Методика оптимального управления электропотреблением и место в ней процедуры потенцирования

Под потенцированием вообще предлагается считать процедуру оптимального управления ресурсами ПЭК, заключающуюся в определении интегрального количества ресурса, на величину которого на данном временном интервале должно быть сокращено ресурсопотребление ПЭК без ущерба его нормальному функционированию [3, 4]. Очевидно, что применительно к электроэнергии процедура потенцирования сводится к определению и последующему использованию в процессе управления потенциала энергосбережения. Здесь следует отметить терминологическую особенность, заключающуюся в том, что, следуя традиции, понятие энергосбережения мы будем относить лишь к электроэнергии, что позволит избежать понятия «электросбережение», которое почти

не находит применения в современной научной литературе и нормативных документах. Не будем мы применять и выражение «экономия электроэнергии», которое со словом «потенциал» составляет достаточно громоздкую фразу и в современной литературе практически не встречается.

Вопросами определения потенциала энергосбережения посвящено множество проектов и научных трудов зарубежных учёных и бизнесменов. Группой зарубежных специалистов в области повышения эффективности потребления природных ресурсов (Weizsecker E.U., BlochLevins A., Mountain R., HunterLovins L.) был введён в обиход так называемый «фактор четыре» – жить в два раза лучше и в то же время тратить в два раза меньше ресурсов. По сути – это новый подход к определению потенциала энергосбережения, ставя во главу угла увеличение продуктивности ресурсов за счёт конструктивных и организационных мер. В настоящее время данный метод реализован в следующих странах: США, Германия, Великобритания, Голландия, Австрия, Дания, Финляндия.

Большой вклад в развитие теории определения потенциала энергосбережения внесли учёные крупных исследовательских центров в Европе и США. В составе знаменитой Национальной лаборатории министерства энергетики США (Lawrence Berkeley National Laboratory – LBNL) Arthur Rosenfeld организовал отдел по энергосбережению в строительстве, который и стал одним из «законодателей мод» в этой отрасли. Именно LBNL в тесном контакте с европейскими специалистами разработала технологию промышленного производства магнетронного нанесения теплоотражающих покрытий на большеформатные листовые стёкла, что стало реальным прорывом в оконной отрасли.

В работах Ф. Хайека, М. Фридмана, Р. Лукаса предлагаются подходы к определению потенциала энергосбережения на основе внутрифирменного управления издержками производства, технической и экономической его эффективностью за счёт внедрения прогрессивных энерготехнологий.

Представители кейнсианского и неокейнсианского направления экономической теории (Д. Мида, Д. Тобина, Р. Солоу, Н. Калдора, Дж. М. Кейнса) считают, что государство способно взять на себя функции создания для всех участников хозяйственной деятельности концепции определения потенциала энергосбережения.

В России существующие подходы к определению потенциала энергосбережения условно можно разделить на две большие группы: классические и техноценологические.

Классические методы (работы Н.И. Данилова, Я.М. Щелокова, В.В. Добродеев, О.Л. Данилова, А.Б. Горяева, И.В. Яковлева, А.Н. Дмитриева, В.В. Литвака, В.С. Степанова и др.), основывающиеся на гауссовой математической статистике, предполагают нормальное распределение параметров реального объекта и пересчет его электропотребления на основе некоторого идеального аналога в модельном или базовом технологическом процес-

се. Определение потенциала энергосбережения одинаковых по составу, но работающих в разных условиях объектов приводит к различным оценкам, что делает необходимым учитывать специфику каждого. Полученные оценки потенциала энергосбережения для совокупности объектов носят индивидуальный характер, а их сумма не позволяет объективно оценить соответствующую величину за предприятие в целом.

Техноценологические методы (работы Б.И. Кудрина, В.И. Гнатьюка, В.В. Фуфаева, О.Е. Лагуткина, М.Г. Ошуркова, Б.В. Жилина, А.Е. Северина, С.Н. Гринкевича и др.) основываются на техноценологическом подходе, цифровой математической статистике и теории гиперболических безгранично делимых H -распределений. При этом предполагается, что совокупность объектов рассматриваемого предприятия образует систему особого типа – техноценоз – ограниченную в пространстве и времени взаимосвязанную совокупность функционально законченных технических изделий, объединенных слабыми связями. Связи в техноценозе носят особый характер, обусловленный технологической независимостью и многообразием решаемых задач [2-4].

Таким образом, в методике оптимального управления электропотреблением под потенцированием будем понимать процедуру, заключающуюся в определении потенциала энергосбережения, на величину которого на данном временном интервале должно быть сокращено электропотребление ПЭК без ущерба нормальному функционированию объектов. Определим ключевое в процедуре потенцирования понятие потенциала энергосбережения (рис. 4).

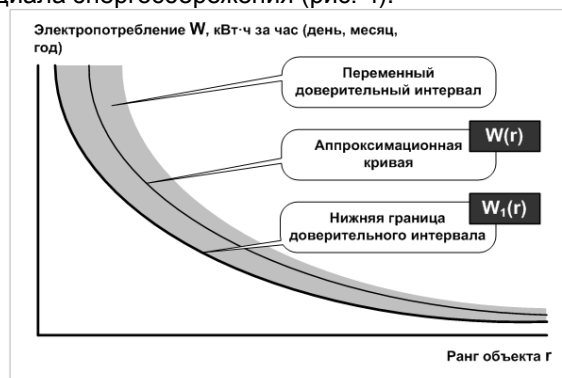


Рис. 4. К понятию системного потенциала энергосбережения

Потенциал энергосбережения (системный потенциал энергосбережения) – полученная на расчетную глубину времени абсолютная разница между электропотреблением ПЭК (в кВт·ч) без реализации энергосберегающих процедур, с одной стороны, и электропотреблением, соответствующим нижней границе переменного доверительного интервала, с другой. Электропотребление объектов ПЭК рассчитывается как интеграл в пределах от нуля до бесконечности под соответствующей кривой рангового параметрического распределения. При этом, в качестве расчетной

берется либо кривая, полученная для эмпирических значений электропотребления объектов, либо нижняя граница переменного доверительного интервала. Расчетный промежуток времени определяется, с одной стороны, глубиной базы данных по электропотреблению в прошлом, на основе которой строится переменный доверительный интервал, а с другой – требуемым горизонтом моделирования потенциала в будущем.

Следует отметить принципиальное отличие техноценологического подхода от традиционного, когда под потенциалом энергосбережения понимается, по сути, сумма полученных по отдельности для каждой электроустановки разностей между реально существующим электропотреблением и некоторым гипотетическим значением электропотребления данной установки, которое могло бы быть, если бы в ней были реализованы некие лучшие показатели энергоэффективности. При этом, нигде в доступной нам литературе не раскрываются следующие важные моменты: во-первых, на каком основании сделано заключение, что потенциал энергосбережения техноценоза обладает свойством аддитивности, т.е. его можно рассчитать как сумму потенциалов энергосбережения отдельных электроприемников; во-вторых, откуда предполагается брать и как интерпретировать эти самые «лучшие показатели энергоэффективности»; в-третьих, как учитывается степень доступности лучших показателей энергоэффективности на данном конкретном оборудовании данного конкретного техноценоза; в-четвертых, где находится нижний предел электропотребления, ниже которого в техноценозе без нарушения нормального технологического процесса опускаться просто нельзя; в-пятых, как рассчитанный путем суммирования показателей отдельных электроприемников потенциал энергосбережения может быть использован в повседневном процессе управления электропотреблением; в-шестых, каким образом можно с известной степенью достоверности вести речь об одномоментном определении электропотребления сотен тысяч (или даже миллионов) отдельных электроприемников (от зарядника мобильного телефона или чайника до конвертера или доменной печи), которые, к тому же, на девяносто девять процентов не имеют системы индивидуального учета электропотребления.

Для того чтобы подчеркнуть обсуждаемое принципиальное отличие предлагается вводимый системный потенциал, рассчитываемый с помощью известных из рангового анализа ципфовых распределений обозначать как Z-потенциал (по первой букве фамилии известного ученого George Kingsley Zipf) и рассчитывать следующим образом [3, 4]:

$$\Delta W_1 = \int_0^{\infty} W(r) dr - \int_0^{\infty} W_1(r) dr, \quad (1)$$

где ΔW_1 – потенциал энергосбережения;

$W(r)$ – аппроксимационная кривая, полученная для эмпирических значений электропотребления объектов (r – ранг);
 $W_1(r)$ – нижняя граница переменного доверительного интервала, полученная на основе обработки базы данных.

2. Результаты расчёта потенциала энергосбережения объектов припортового электротехнического комплекса

Экономическая оценка результатов расчёта потенциала энергосбережения ПЭК заключается в количественном сопоставлении затрат с величиной поступающей прибыли. Данное сопоставление осуществляется по сроку окупаемости мероприятий на объектах ПЭК с учётом дисконтирования поступающих доходов, величине индекса доходности инвестиций и других показателей (табл. 1, 2). При производстве расчетов предполагался прямой возврат инвестиций, вложенных в энергосбережение [3, 4].

Таблица 1

Показатели экономической оценки для стратегии, ориентированной на достижение Z1-потенциала

Показатель	Шаги ZP-плана					
	0	1	2	3	4	5
Дисконтированный доход, млн. руб.	-4,1	2,68	2,19	1,8	0,89	0,08
Чистая прибыль, млн. руб.	-4,1	-1,5	0,76	2,54	3,45	3,51
Доля прибыли в фонде энергосбережения	0	0,46	0,45	0,42	0,4	0,4

Таблица 2

Показатели экономической оценки для стратегии, ориентированной на достижение Z2-потенциала

Показатель	Шаги ZP-плана					
	0	1	2	3	4	5
Дисконтированный доход, млн. руб.	-35	29,2	21	17,5	12,1	5,93
Чистая прибыль, млн. руб.	-35	-5,3	17,8	35,3	47,4	53,3
Доля прибыли в фонде энергосбережения	0	0,7	0,65	0,58	0,47	0,3

Реализация разработанного ZP-плана позволит при первоначальных инвестициях в 4,12 млн. руб. для Z1-потенциала и 34,39 – для Z2-потенциала получить чистую прибыль в размере

3,51 и 53,3 млн. руб., соответственно. При этом расчетное значение индекса доходности для первой стратегии составляет 0,89, для второй – 1,55. Более высокая доходность во втором случае обусловлена, с одной стороны, массовым техническим переоснащением объектов, а с другой – более равномерным формированием фонда энергосбережения на всём горизонте планирования.

Проверка адекватности осуществлялась на основе анализа статистических гипотез, подтверждающих правомерность применения выбранных вероятностных законов. Оценка работоспособности строилась на сравнительном анализе качества на перспективу пяти лет двух вариантов ZP-плана (табл. 3) при помощи следующей системы показателей: доля реализованного Z-потенциала энергосбережения Δ , среднее \bar{s} и максимальное s^{max} относительное отклонение электропотребления объектов от границы Z-потенциала, доля объектов, достигнувших границы Z-потенциала n_{ZP} .

Таблица 3

Показатели качества ZP-плана

Показатель	Стратегия достижения уровня	
	Z1-потенциала	Z2-потенциала
Δ , %	99,97	99,95
\bar{s} , %	0,28	0,21
s^{max} , %	5,92	6,41
n_{ZP} , %	85,95	90,08

В ходе проверки адекватности значения статистических критериев не превысили критических. Значения показателей качества обоих вариантов ZP-плана согласуются между собой, соответствуют замыслу методики ZP-анализа и определяется сущностью и особенностями Z1- и Z2-потенциалов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанная методика корректна и её применение обосновано для управления электропотреблением крупного промышленного предприятия [3, 4].

Заключение

Таким образом, в работе авторами предложены пути повышения оптимального использования электроэнергии и определения потенциала энергосбережения для объектов припортового электроэнергетического комплекса в рамках использования интеллектуальных энергетических систем. Результаты работы могут дать мультипликативный эффект при переходе в дальнейшем к распределенным сетевым энергосистемам.

Литература

1. Гнатюк В.И., Луценко Д.В., Кивчун О.Р. и др. Ранговое параметрическое распределение техноценоза на бифуркационном этапе развития // Механизация строительства. 2014. № 10. С. 44-47.
2. Гнатюк В.И., Луценко Д.В., Кивчун О.Р., Васильев В.Н. Методика мониторинга электропотребления электротехнического комплекса Калининградской области // Промышленная энергетика. 2015. № 3. С. 26-35.
3. Гнатюк В.И., Луценко Д.В., Кивчун О.Р., Примаков Л.В. Потенширование в методике управления электропотреблением техноценоза // Механизация строительства. 2014. № 8. С. 19-27.
4. Потенциал энергосберегающего промышленного электротехнического комплекса / А.А. Займенко, В.И. Гнатюк // XL Всероссийская научно-практическая конференция: сб. тр. М., 2010. С. 54

References

1. Gnatyuk V.I., Lutsenko D.V., Kivchun O.R. i dr. *Rangovoe parametricheskoe raspredelenie tekhnotsenoza na bifurkatsionnom etape razvitiya*. Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2014. № 10. Pp. 44-47.
2. Gnatyuk V.I., Lutsenko D.V., Kivchun O.R., Vasil'ev V.N. *Metodika monitoringa elektropotrebleniya elektrotekhnicheskogo kompleksa Kaliningradskoy oblasti*. Promyshlennaya energetika. 2015. № 3. Pp. 26-35.
3. Gnatyuk V.I., Lutsenko D.V., Kivchun O.R., Primak L.V. *Potenshirovanie v metodike upravleniya elektropotrebleniem tekhnotsenoza*. Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2014. № 8. Pp. 19-27.
4. *Potentsial energosberegayushchego promyshlennogo elektrotekhnicheskogo kompleksa*. A.A. Zaymenko, V.I. Gnatyuk // XL Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya: sb. tr. M., 2010. Pp. 54

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК: 621.396.67

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ОБЛУ-
ЧАТЕЛЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ
ИНМАРСАТ-С****Елена Вячеславовна Волхонская**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей

доцент кафедры теоретических основ радиотехники
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6
e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Аннотация

В данной работе приведены результаты математического моделирования микрополоскового облучателя зеркальной антенны спутниковой системы связи ИНМАРСАТ-С, являющегося альтернативой часто применяемым рупорным облучателям. На основе комплексного подхода в рамках метода наведенных ЭДС и теории электрических цепей с распределенными параметрами, предложенного авторами, построена электродинамическая модель логопериодической антенны, отличающаяся от известных учетом взаимодействия всех излучающих элементов антенны, как через распределительный фидер, так и посредством электромагнитного поля. Выявлено существенное рассогласование излучающих элементов логопериодической антенны типовой конфигурации с распределительным фидером и предложено новое техническое решение микрополоскового облучателя. На основе предложенного алгоритма оптимизации конструктивных параметров облучателя получена новая конфигурация, позволяющая снизить коэффициент стоячей волны в питающем фидере до значений 1,1 - 1,8 во всем рабочем диапазоне частот при достижимом уровне значений коэффициента усиления антенны от 9,4 до 12,7 дБ.

Ключевые слова: микрополосковый облучатель, логопериодическая антенна, фидер, коэффициент стоячей волны, коэффициент усиления.

**MATHEMATICAL MODELING OF SATELLITE ANTENNA MICROSTRIP IR-
RADIATOR OF SATELLITE INMARSAT-C COMMUNICATION SYSTEM****Elena Volkhonskaya**

the associate professor, Dr.Sci.Tech.,
the professor of department of ship radio engineering systems
Baltic state academy of the fishery fleet
Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeniy Korotey

the associate professor of department of theoretical bases of radio engineering
Baltic state academy of the fishery fleet
Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation
e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Abstract

The results of satellite antenna microstrip irradiator of satellite INMARSAT-C communication system mathematical modeling, being an alternative to often applied horn irradicators, are represented in this work. The electrodynamic model of the log-periodic antenna differing from all studying antenna el-

elements known for the accounting of interaction both through a distributive feeder, and by means of the electromagnetic field was constructed on the basis of an integrated approach within a method of the induced EMFs and the theory of electric chains with the distributed parameters, offered by authors. The essential mismatch of the standard configuration log-periodic antenna radiating elements with a distributive feeder is established and new technical solution of a microstrip irradiator is proposed. The new configuration of an irradiator allowing to lower standing wave ratio in the feeding feeder to values 1,1 - 1,8 in all operating range of frequencies in case of the achievable level of antenna gain values from 9,4 to 12,7 dBi is received on the basis of the offered algorithm of design parameters optimization.

Key words: microstrip irradiator, log-periodic antenna, feeder, standing wave ratio, antenna gain.

Введение

В состав спутниковых систем связи и навигации, осуществляющих мониторинг водных биологических ресурсов, наблюдение и контроль за деятельностью промысловых судов, входят антенные системы зеркального типа береговых земных станций (БЗС).

В качестве облучателей данных антенн широко применяются рупорные антенны, которые имеют ряд недостатков, в частности, рассогласование со свободным пространством, существенную область затенения рефлектора прямофокусных антенн, несинфазность поля в раскрыве, смещение облучателя относительно фокальной оси в процессе эксплуатации под влиянием внешних факторов и пр. [1] – [3], приводящих к уменьшению коэффициента использования поверхности антенны и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления всей антенной системы. В качестве альтернативы в настоящее время в спутниковых системах связи находят применение микрополосковые облучатели, в частности логопериодические антенны (ЛПА), которые лишены указанных недостатков [4]. В настоящей работе представлены результаты математического моделирования микрополоскового облучателя логопериодического типа спутниковой антенны БЗС.

1. Постановка задачи

Ключевым вопросом при построении электродинамической модели антенн многовibratorного типа является расчет амплитудно-фазового распределения клеммных токов излучающих элементов.

Решение данной частной задачи осуществляется с использованием различных методик [5, 6], которые базируются на известном методе наведенных ЭДС [7,8]. Допущения и ограничения, вводимые в них, такие как представление излучающего элемента бесконечно тонким, прямолинейным, идеально проводящим, учет пространственной электромагнитной взаимосвязи ограниченного числа излучающих элементов, согласованность излучающих элементов с распределительным фидером, отсутствие взаимодействия излучающих элементов через распределительный фидер [5, 6], не позволяют произвести точную оценку полевых характеристик и электрических параметров многовibratorных антенн [9].

Таким образом, представляется актуальным построение электродинамических моделей облучателей многовibratorного типа, учитывающих различные аспекты взаимодействия их излучающих элементов.

2. Электродинамическая модель ЛПА

В [9] впервые предложена методика расчета амплитудно-фазовых распределений клеммных токов вдоль ЛПА, в которой производится учет влияния распределительного фидера и рассогласования излучающих элементов с фидером.

При построении электродинамической модели применен комплексный подход на основе метода наведенных ЭДС, позволяющего учесть пространственную электромагнитную взаимосвязь излучающих элементов, и представления ЛПА в виде неоднородной длинной линии в рамках теории электрических цепей с распределенными параметрами.

Базовыми соотношениями при расчете амплитудно-фазового распределения клеммных токов являются:

- в методе наведенных ЭДС

$$\dot{I}_i = \sum_{k=1}^N Z_{ik}^{-1} \dot{U}_k, \quad i = 1..N, \quad (1)$$

где номер $i = 1$ соответствует излучающему элементу с наибольшей длиной плеча (конец антенны), N – количество излучающих элементов, \dot{I}_i и \dot{U}_k – комплексные амплитуды клеммных токов и напряжений излучающих элементов, Z_{ik}^{-1} – элементы матрицы, обратной по отношению к матрице собственных и взаимных сопротивлений [7] излучающих элементов;

$$Z_{in,i} = \sum_{k=1}^N Z_{ik} \frac{\dot{I}_k}{\dot{I}_i}, \quad i = 1..N, \quad (2)$$

где $Z_{in,i}$ – входной импеданс излучающего элемента;

- в теории цепей с распределенными параметрами

$$\frac{\dot{U}_{i-1}}{\dot{U}_i} = \frac{Z_{e,i}}{Z_{e,i} \operatorname{ch}(\gamma S_{i-1}) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma S_{i-1})}, \quad (3)$$

где $Z_{e,i}$ – эквивалентное сопротивление параллельного соединения входных импедансов излучающего элемента $Z_{in,i}$ и отрезка неоднородного распределительного фидера $Z_{f,i}$ (с учетом входных импедансов излучающих элементов с номерами $k=1..(i-1)$) в точках подключения i -ого элемента, γ – комплексный коэффициент распространения волны в фидере, S_{i-1} – длина отрезка распределительного фидера, заключенного между i -ым и $(i-1)$ -ым элементами, Z_0 – волновое сопротивление распределительного фидера, причем \dot{U}_N – комплексная амплитуда напряжения, создаваемая питающим коаксиальным фидером на клеммах элемента с наименьшей длиной плеча;

$$Z_{f,i} = Z_0 \frac{Z_{e,(i-1)} + Z_0 \operatorname{th}(\gamma S_{i-1})}{Z_0 + Z_{e,(i-1)} \operatorname{th}(\gamma S_{i-1})}, \quad (4)$$

где при $i=1$ $Z_{f,i} = Z_I = Z_0 \operatorname{th}(\gamma S_I)$ – комплексное сопротивление короткозамкнутого шлейфа длиной S_I , подключенного к клеммам элемента с наибольшей длиной плеча.

Соотношения (1) – (4) представляют собой систему рекуррентных уравнений, совместное решение которых определяет амплитудно-фазовое распределение клеммных токов в ЛПА.

Поле излучения ЛПА в дальней зоне определялось в соответствии с выражением:

$$\dot{E}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N \dot{E}_i(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где $\dot{E}_i(\theta, \varphi)$ – комплексная амплитуда напряженности электрического поля, создаваемая i -ым излучающим элементом, описываемая выражением вида [8]

$$\dot{E}_i(\theta, \varphi) = \frac{60 j I_i}{\sin(\beta l_i)} \cdot \frac{\cos(\beta l_i \sin \theta \sin \varphi) - \cos(\beta l_i)}{\sqrt{1 - (\sin \theta \sin \varphi)^2}} \cdot \frac{e^{-j \beta R_1}}{R_1},$$

где j – мнимая единица, β – волновое число, l_i – длина плеча излучающего элемента, (θ, φ) – сферические угловые координаты, и введено обозначение

$$R_1 = \sqrt{R^2 + r_i^2 - 2 R r_i \cos \theta},$$

в котором R и r_i – расстояния от конца антенны до точки наблюдения и клемм i -ого элемента, соответственно.

Для оценки направленных свойств и электрических параметров ЛПА в среде MathCAD написан программный код [10], в основу которого положена приведенная выше электродинамическая модель.

Система рекуррентных уравнений (1) – (4) решалась методом простой итерации [11], в котором в качестве нулевого приближения использовались клеммные токи излучающих элементов в предположении наличия только пространственной электромагнитной связи между ними. Процедура расчета прерывалась, если на данном шаге итерации значения амплитуд всех клеммных токов отличались от своих предыдущих значений не более чем на 0,5 %. На рис. 1 приведен типовой вид зависимости КСВ в питающем фидере от номера резонирующего элемента классической ЛПА.

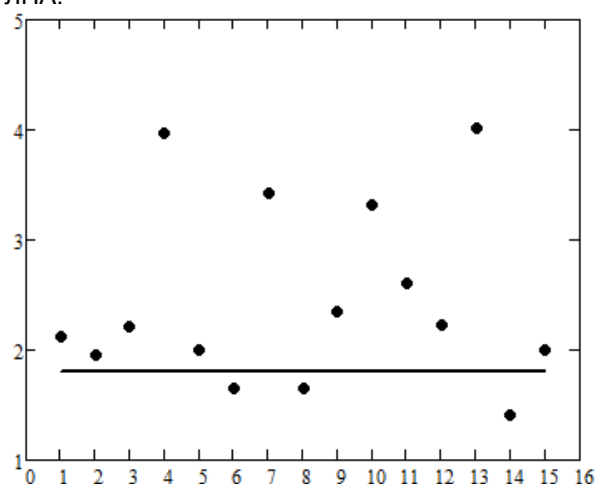


Рис. 1. Зависимость КСВ в питающем фидере от номера резонирующего элемента ЛПА

Анализ результатов модельных исследований амплитудно-фазового распределения клеммных токов и частотной зависимости КСВ показал высокую степень рассогласования излучающих элементов с распределительным фидером и всей антенны с питающим фидером. В работе [12] авторами предложено новое техническое решение микрополоскового логопериодического облучателя С диапазона, отличающееся от известных конструкций изменением ширины полоскового распределительного фидера и эквивалентных радиусов излучающих полосковых элементов вдоль структуры антенны по экспоненциальному закону (рис. 2).

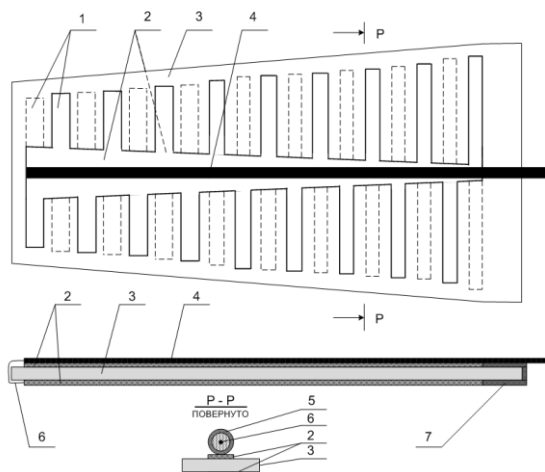


Рис. 2. Внешний вид ЛПА с диапазона: 1 - излучающие элементы, 2 - распределительный фидер, 3 - диэлектрическое основание, 4 - питающий фидер, 5 - оплетка питающего фидера, 6 - центральная жила питающего фидера, 7 - короткозамкнутый шлейф

3. Оптимизация геометрии облучателя

Оптимизация конструктивных параметров микрополоскового облучателя имела цель повысить степень согласования входного сопротивления ЛПА с питающим фидером и достигнуть максимально возможных значений КНД при стабильной ширине диаграммы направленности во всем рабочем диапазоне частот.

В качестве оптимизируемых параметров были выбраны интенсивность уменьшения зазора между точками питания излучающих элементов (параметр P_1), отношение полуширины самого короткого полоскового элемента к расстоянию между его точками питания (параметр P_2), интенсивность уменьшения ширины полосковых элементов (параметр P_3) и длина короткозамкнутого шлейфа (параметр P_4). Оптимизация выполнялась методом покоординатного спуска [11] в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3.

Результатом оптимизации явились следующие значения конструктивных параметров:

$$w_i = w_N \tau^{P_1(N-i)}, P_1 = 2,6, i = 1..N, \quad (6)$$

где w_i – расстояние между точками питания излучающих элементов, τ – период структуры;

$$a_i = a_N \tau^{P_3(i-N)}, P_3 = 2,5, i = 1..N \quad (7)$$

где a_i – полуширина излучающего элемента;

$$P_2 = \frac{a_N}{w_N} = 0,5, P_4 = L_{ш} = \lambda_{\max} / 8, \quad (8)$$

где $L_{ш}$ – длина короткозамкнутого шлейфа, λ_{\max} – максимальная из рабочих длин волн.

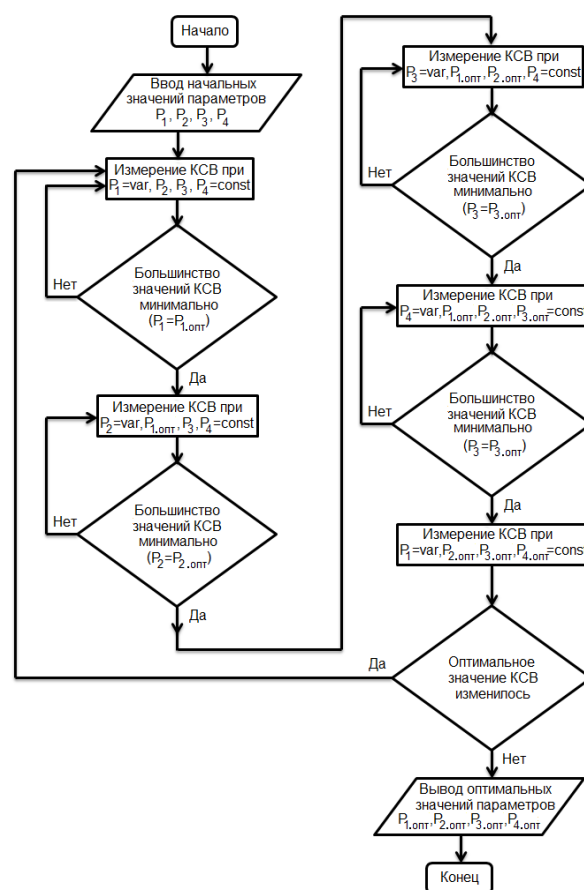


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации конструктивных параметров микрополоскового облучателя

4. Результаты модельных исследований

На рис. 4. приведена частотная зависимость КСВ в питающем фидере микрополоскового облучателя с оптимизированными конструктивными параметрами.

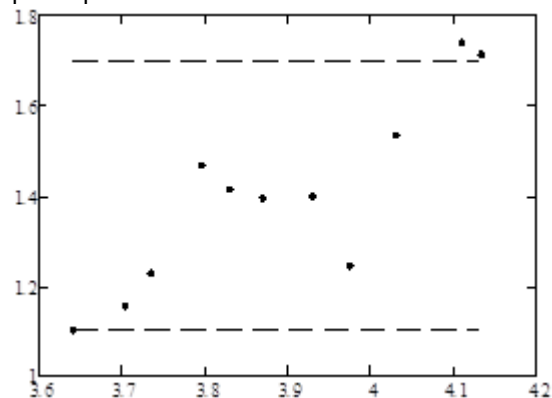


Рис. 4. Частотная зависимость КСВ в питающем фидере оптимизированного облучателя: по оси абсцисс отложены значения частоты в ГГц

Анализ данной зависимости показал, что в пределах всего рабочего диапазона частот значения КСВ лежат в диапазоне 1.1 – 1.8, что в сравнении со значениями КСВ для неоптимизированной структуры ЛПА (рис. 1) свидетельствует о высокой степени согласования антенны с пита-

ющим фидером при достижимом уровне значений коэффициента усиления антенны от 9,4 до 12,7 дБ.

Заключение

Таким образом, результатом математического моделирования явилась оптимизированная конфигурация ЛПА микрополоскового исполнения С диапазона, обеспечивающая снижение коэффициента стоячей волны в питающем фидере до значений 1,1 - 1,8 во всем рабочем диапазоне

частот при достижимом уровне значений коэффициента усиления антенны от 9,4 до 12,7 дБ.

Для определения эффективности применения оптимизированной ЛПА в качестве облучателя зеркальных антенн авторы предлагают провести соответствующие модельные исследования электрических параметров и направленных свойств зеркальных антенн с облучателями рулонного и микрополоскового типов.

Литература

- Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 208 с.
- Устройства СВЧ и антенны / [под ред. Д. И. Воскресенского]. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
- Фролов О. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 376 с.
- ROHDE&SCHWARZ [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rohde-schwarz.ru> (дата обращения 10.03.2017).
- Петров Б. М. Логопериодические вибраторные антенны: учебное пособие для вузов / Б. М. Петров, Г. И. Костромин, Е. В. Горемыкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 239 с.
- Кочержевский Г. Н. Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов / Г. Н. Кочержевский, Г. А. Ерохин, Н. Д. Козырев. – М.: «Радио и связь», 1989. – 351 с.
- Айзенберг Г. З. Антенны УКВ.ч.1 / Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский, О. Н. Терешин. – М.: Связь, 1977. – 384 с.
- Драбкин А. Л. Антенно-фидерные устройства. / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко. – М.: Советское радио, 1961. – 816 с.
- Волхонская Е. В. Расчет электрических параметров многоэлементной антенны с учетом взаимодействия элементов посредством фидерной линии / Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, Д. В. Кузечкин // Радиосистемы «Территориально-распределенные системы охраны». - №11. – М.: Радиотехника, 2013. – С. 43-46.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619459 от 4.09.2015. Анализ направленных свойств и электрических параметров логопериодической вибраторной антенны. / Е. В. Коротей, Е. В. Волхонская, Д. В. Кузечкин.
- Турчак Л. И. Основы численных методов: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Л. И. Турчак, П. В. Плотноков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.
- Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Кузечкин Д. В. Микрополосковая логопериодическая антенна // Патент на изобретение №2571607 от 24.11.2015.

References

- Vud P. Analiz i proektirovanie zerkal'nyh anten: Per. s angl. – M.: Radio i svyaz', 1984. – 208 s.
- Ustrojstva SVCH i anteny / [pod red. D. I. Voskresenskogo]. – Izd. 2-e, dop. i pererab. – M.: Radiotekhnika, 2006. – 376 s.
- Frolov O. P. Antenny dlya zemnyh stancij sputnikovoj svyazi. – M.: Radio i svyaz', 2000. – 376 s.
- ROHDE&SCHWARZ [Elektronnyj resurs]: URL: <https://www.rohde-schwarz.ru> (data obrashcheniya 10.03.2017).
- Petrov B. M. Logoperiodicheskie vibratornye anteny: uchebnoe posobie dlya vuzov / B. M. Petrov, G. I. Kostromin, E. V. Goremykin. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2005. – 239 s.
- Kocherzhevskij G. N. Antenno-fidernye ustrojstva: uchebnik dlya vuzov / G. N. Kocherzhevskij, G. A. Erohin, N. D. Kozyrev. – M.: «Radio i svyaz'», 1989. – 351 s.
- Ajzenberg G. Z. Antenny UKV.ch.1 / G. Z. Ajzenberg, V. G. YAmopol'skij, O. N. Tereshin. – M.: Svyaz', 1977. – 384 s.
- Drabkin A. L. Antenno-fidernye ustrojstva. / A. L. Drabkin, V. L. Zuzenko. – M.: Sovetskoe radio, 1961. – 816 s.
- Volhonskaya E. V. Raschet ehlektricheskikh parametrov mnogoehlementnoj anteny s uchedom vzaimodejstviya ehlementov posredstvom fidernoj linii / E. V. Volhonskaya, E. V. Korotej, D. V. Kuzhekin // Radiosistemy «Territorial'no-rasprelennye sistemy ohrany». - №11. – M.: Radiotekhnika, 2013. – S. 43-46.
- Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVМ № 2015619459 ot 4.09.2015. Analiz napravlennyh svojstv i ehlektricheskikh parametrov logoperiodicheskoy vibratornoj anteny. / E. V. Korotej, E. V. Volhonskaya, D. V. Kuzhekin.
- Turchak L. I. Osnovy chislennyh metodov: uchebnoe posobie. – 2-e izd., pererab. i dop. / L. I. Turchak, P. V. Plotnikov. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 304 s.
- Volhonskaya E. V., Korotej E. V., Kuzhekin D. V. Mikropoloskovaya logoperiodicheskaya antenna // Patent na izobretenie №2571607 ot 24.11.2015.

УДК 639.2.081.117.212, 532.5.011, 519.63

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПОРНОЙ ТРАЛОВОЙ ДОСКИ С ВОДНОЙ СРЕДОЙ

Александр Алексеевич Недоступ

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр-т, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев

соискатель кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр-т, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Аннотация

В данной статье описана имитационная модель таких твердотельных элементов разноглубинной траловой системы, как распорных траловых досок. При помощи данной модели вычисляются и сохраняются в табличной форме с заданной степенью дискретизации необходимые для последующего имитационного моделирования траловой системы зависимости силовых от пространственно-временных характеристик твердотельных элементов. При расчете силовых характеристик используется вычисленное численным методом расщепления поле давлений на поверхности твердотельного элемента.

Предложенная математическая модель распорной траловой доски за счет замены непосредственных вычислений на каждой итерации алгоритма табличным преобразованием позволяет уменьшить трудоемкость процесса моделирования разноглубинной траловой системы на ЭВМ. На основании приведенной математической модели будет создана и компьютерная программа расчета пространственно-временных характеристик твердотельных элементов.

Ключевые слова: трал, траловая доска, моделирование, гидродинамика, уравнения Навье-Стокса, метод покоординатного расщепления.

A MATHEMATICAL MODEL OF INTERACTION OF THE TRAWL DOOR WITH THE AQUATIC ENVIRONMENT

Alexander Nedostup

PhD in Technical Sciences, associate professor of the Industrial Fisheries Department
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey Razhev

applicant of the Industrial Fisheries Department
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Abstract

This article describes a simulation model of such solid elements of the mid-water trawl system as the otter doors. Using this model, dependences of power versus space-time characteristics of solid elements sampling necessary for the subsequent simulation modeling of a trawl system are calculated and stored in a tabular form with a given degree of based on power from space-time characteristics of solid elements. A pressure field on the surface of the solid element calculated by the numerical method is used when calculating the power characteristics.

The suggested mathematical model of the trawl door due to the replacement of direct calculations at each iteration of the algorithm by tabular transformation makes it possible to reduce the laboriousness of the modeling of the inter-deep trawl system on a computer. Based on the above mathematical model, a computer program for calculating the space-time characteristics of solid elements will be created.

Key words: trawl, trawl door, modeling, hydrodynamics, Navier-Stokes equations, alternating direction implicit method

Введение

В состав разноглубинной траловой системы входят не только канатно-веревочные элементы, но и твердые тела, для математического моделирования динамики которых необходимо учитывать их кинематические свойства. Для внедрения твердого тела в общую математическую модель точечных масс [1,2] необходимо определить зависимости, связывающие силовые и пространственно-временные характеристики в точках соединения твердого тела с канатно-веревочной частью системы.

Данная тематика исследований отражена в [3,4]. В указанных работах взаимодействие гидродинамические характеристики траловой доски вычисляются по заданным постоянным углам атаки, крена и дифферента только для ее рабочих положений без учета изменения угловой и линейной скорости. К тому же в реальных условиях возможны не только рабочие положения траловой доски, что необходимо учесть в процессе моделирования хотя бы для корректности работы алгоритма.

В данной статье авторами предлагается математическая модель, основанная на более точном вычислении гидродинамических характеристик траловой доски, основанная на системе уравнений Навье-Стокса с эффективной оптимизацией вычислений.

1. Цель и задачи

Для вычисления сил гидродинамического сопротивления по скоростям твердого тела необходимо решить систему уравнений Навье-Стокса. Данная задача является трудоемкой с точки зрения вычислений, поэтому предлагается заменить процесс решения систем уравнений табличным преобразованием с линейной интерполяцией промежуточных значений (1):

$$(\omega; \mathbf{v}_0) \rightarrow (\mathbf{R}; \mathbf{M}\mathbf{r}), \quad (1)$$

где \mathbf{v}_0 – линейная скорость центра масс; ω – угловая скорость вращения относительно центра масс; \mathbf{R} – сила гидродинамического сопротивления, приложенная к центру масс; $\mathbf{M}\mathbf{r}$ – вращающий момент сил гидродинамического сопротивления относительно центра масс.

Процесс заполнения таблицы выполняется посредством численного решения уравнений Навье-Стокса методом расщепления на трехмерной пространственной сетке [5,6]. Шаг сетки выбирается исходя из требуемой точности вычислений. Исходными параметрами метода является поле скоростей, а выходными – поле давлений.

По полученному полю давлений находятся сила гидродинамического сопротивления, приложенная к центру масс, и крутящий момент сил

гидродинамического сопротивления относительно центра масс (2):

$$\mathbf{R} = \sum_i S_i p_i \mathbf{n}_i, \quad \mathbf{M}\mathbf{r} = \sum_i S_i p_i \mathbf{n}_i \times \mathbf{r}_i, \quad (2)$$

где S_i – площадь поверхности элементов тела внутри i -ой ячейки сетки; p_i – давление в i -ой ячейке; \mathbf{n}_i – вектор нормали к поверхности, ориентированный внутрь элемента тела; $i \in N$ – номер ячейки, через которую проходит поверхность элемента тела; N – множество всех ячеек, через которые проходят поверхности.

2. Материалы и методы

Опишем связь полей скорости и давления через полную систему уравнений Навье-Стокса в безразмерной векторной форме [7], включающую уравнение неразрывности (3), закон сохранения движения (4), уравнение теплопроводности (5) и уравнение состояния (6) при начальных условиях: $T = 283^\circ\text{K}$, $\mathbf{v} = 0$ м/с для всех ячеек сетки и граничных условиях $T_\infty = 283^\circ\text{K}$, $\mathbf{v}_\infty = 0$ м/с:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla T + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 T + \frac{\gamma - 1}{\gamma \text{Re}} \Phi, \quad (5)$$

$$p = \rho R T, \quad (6)$$

где $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ – вектор скорости; t – время процесса моделирования; T – температура; Re – число Рейнольдса; $\text{Pr} = 9,4$ (при температуре воды 283°K) – число Прандтля; $R = 8,314$ Дж/(моль·K) – газовая постоянная; $\gamma = 4187$ Дж/(кг·K) – удельная теплоемкость для воды; Φ – диссипативная функция; p – давление; ρ – плотность воды. При скоростях потока гораздо меньше скорости звука изменением плотности можно пренебречь. Безразмерная форма записи вызвана использованием в уравнениях числа Рейнольдса вместо вязкости.

Условие прилипания для каждой точки на поверхности тела задается исходя из текущих значений линейных и угловых скоростей (7):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \omega \times \mathbf{r}, \quad (7)$$

где \mathbf{v}_0 – линейная скорость центра масс; \mathbf{r} – координаты точки в декартовой системе координат с началом в центре масс тела; \times – обозначение векторного произведения.

Диссипативная функция, описывающая необратимую работу вязких сил, представляется в виде (8-11):

$$\Phi = \Phi_x + \Phi_y + \Phi_z, \quad (8)$$

$$\Phi_x = 2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial x} \quad (9)$$

$$\Phi_y = \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial v_y}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial y} \quad (10)$$

$$\Phi_z = \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial v_z}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (11)$$

При численном решении уравнение (3) используется для проверки ошибки вычислений на очередной итерации.

Для ускорения процесса вычислений применив для (4) конечно-разностный метод покоординатного расщепления [8], основная идея которого заключается в расщеплении сложных конечно-разностных уравнений на несколько более простых – по уравнению вдоль каждой из осей координат, получим для x -компоненты три уравнения (12-14):

$$\frac{\partial v_x}{3\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial v_x}{3\partial t} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial v_x}{3\partial t} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}, \quad (14)$$

Расщепление проводится так, что производные вдоль соответствующего направления берутся явно, а остальные координаты считаются постоянными.

Расщепив подобным образом остальные уравнения и применив к ним неявную конечно-разностную схему первого порядка по времени и второго порядка по пространственным координатам на регулярной сетке получим набор независимых трехдиагональных систем при фиксированных y, z (12); x, z (13); y, z (14).

На примере уравнения (12) для каждой пары (j, k) получим следующую конечно-разностную схему (15):

$$\begin{aligned} & \frac{v_{x[i,j,k]}^{n+1} - v_{x[i,j,k]}^n}{\Delta t} + v_{x[i,j,k]}^n \frac{v_{x[i+1,j,k]}^{n+1} - v_{x[i-1,j,k]}^{n+1}}{\Delta x} = \\ & - \frac{T_{x[i+1,j,k]}^n - T_{x[i-1,j,k]}^n}{\Delta x} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{v_{x[i+1,j,k]}^{n+1} - 2v_{x[i,j,k]}^{n+1} + v_{x[i-1,j,k]}^{n+1}}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (15)$$

где n – номер глобальной итерации; i, j, k – индексы ячейки в трехмерной регулярной сетке.

Уравнение (15) имеет нелинейный коэффициент $v_{x[l,j,k]}^n$ при втором члене в левой части. В связи с этим в процессе решения внутри каждой глобальной итерации необходимо проводить локальные итерации аппроксимации всех нелинейных коэффициентов (дробные шаги) [8].

Блок-схема алгоритма для одного временного шага показана на рис. 1.

3. Результаты

При построении таблицы преобразований (1) после каждого временного шага в шести вложенных циклах осуществляется последовательное изменение всех шести компонент векторов начальных \mathbf{v}_0 и $\boldsymbol{\omega}$ на заданную минимальную величину шага в заданном интервале значений.

Для ускорения процесса построения многомерной таблицы должно быть выполнено условие минимальности шага для всех начальных компонент. Это достигается путем смены знака шага на противоположный при достижении параметром своего граничного значения.

На рис. 2 показан результат расчета поля давлений на поверхности траловой доски, полученный компьютерной программой, созданной на основе предложенной математической модели.

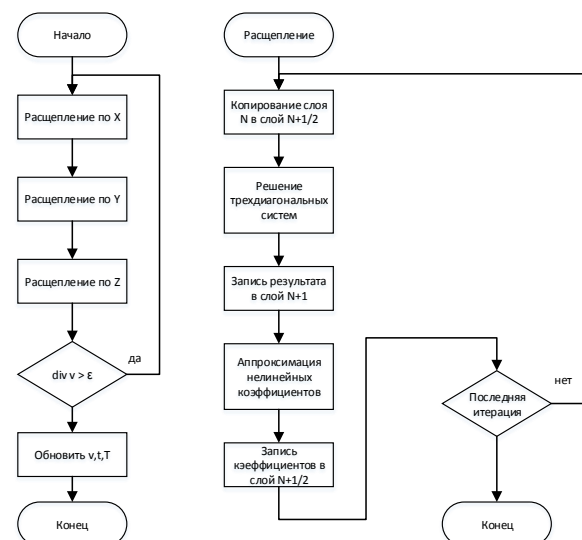


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расщепления

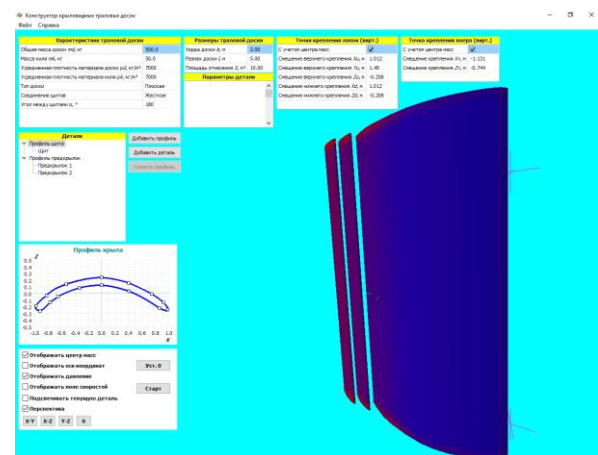


Рис. 2. Распределение поля давления по поверхности траловой доски

Заключение

Предложенная математическая модель распорной траловой доски за счет замены непосредственных вычислений (1) на каждой итерации алгоритма табличным преобразованием позво-

ляет уменьшить трудоемкость процесса моделирования разноглубинной траловой системы на ЭВМ.

Благодарности
Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ №15-08-00464-а.

Литература

1. Недоступ А.А., Володько Д.А., Ражев А.О. Гидродинамический расчет рыболовной сети // Сборник трудов V международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2012». РУДН. Москва. 2012. - С. 27-31.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О., Соколова Е.В., Макаров В.В. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч.III: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2016. - 184 с.
3. Наумов В.А. Метод расчета гидродинамических коэффициентов траловой доски/ В.А. Наумов, Е.Г. Мейлус// Известия КГТУ. - 2005. - №9. - С. 53-57.
4. Наумов В.А. Расчет гидродинамических коэффициентов макета траловой доски цилиндрического профиля/ В.А. Наумов, Е.Г. Мейлус// Промышленное рыболовство: сборник научных трудов/ КГТУ. – Калининград. - 2004. - С. 34-40.
5. Харченко С.А. Влияние распараллеливания вычислений с поверхностными межпроцессорными границами на масштабируемость параллельного итерационного алгоритма решения систем линейных уравнений на примере уравнений вычислительной гидродинамики // Труды Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии», Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г., Челябинск: Издво ЮУрГУ, 2008, с. 494-499.
6. Abe, K., Kondoh, T., Nagano, Y. (1995) "A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-II. Thermal Field Calculation," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 8, pp. 1467-1481.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. М.: Мир, 1991.
8. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967.

References

1. Nedostup A.A., Volodko D.A., Razhev A.O. Gidrodinamicheskiy raschet rybolovnoy seti [Hydrodynamic calculation of the fishing net]. Sbornik trudov V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Inzhenernyie sistemy - 2012». RUDN. Moskva. 2012. S. 27-31.
2. Nedostup A.A., Razhev A.O., Sokolova E.V., Makarov V.V. Matematicheskoe modelirovanie orudiy i protsessov rybolovstva [Mathematical modeling of fishing gear and procedures]. Ch.III: Monografiya. Kaliningrad: Izdatelstvo FGBOU VPO «KGTU», 2016. 184 s.
3. Naumov V.A. Metod rascheta gidrodinamicheskikh koeffitsientov tralovoy doski [Calculation method of hydrodynamic coefficients of a trawl door]. V.A. Naumov, E.G. Meylus. Izvestiya KGTU. 2005. #9. S. 53-57.
4. Naumov V.A. Raschet gidrodinamicheskikh koeffitsientov maketa tralovoy doski tsilindricheskogo profilya [Calculation of hydrodynamic coefficients of the model trawl door of a cylindrical profile]. V.A. Naumov, E.G. Meylus. Promyshlennoe rybolovstvo: sbornik nauchnykh trudov. KGTU. Kaliningrad. 2004. S. 34-40.
5. Harchenko S.A. Vliyaniye rasparallelivaniya vychisleniy s poverhnostnymi mezhprotsessornymi granitsami na masshtabiruemost parallelnogo iteratsionnogo algoritma resheniya sistem lineynykh uravneniy na primere uravneniy vychislitelnoy gidrodinamiki [The effect of parallelization of computations with surface interprocessor boundaries on the scalability of the parallel iterative algorithm for solving systems of linear equations by the example of equations of computational hydrodynamics]. Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Parallelnye vychislitelnye tehnologii», Sankt-Peterburg, 28 yanvarya – 1 fevralya 2008 g., Chelyabinsk: Izdvo YuUrGU, 2008, s. 494-499.
6. Abe, K., Kondoh, T., Nagano, Y. (1995) "A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-II. Thermal Field Calculation," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 8, pp. 1467-1481.
7. Fletcher K. Vychislitelnye metody v dinamike zhidkostey. [Computational methods in fluid dynamics] T. 2. M.: Mir, 1991.
8. Yanenko N.N. Metod drobnnykh shagov resheniya mnogomernykh zadach matematicheskoy fiziki. [Method of fractional steps for solving multidimensional problems of mathematical physics] Novosibirsk: Nauka, 1967.

УДК 532.5.013.12:629.5

СИЛЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГИБКИХ СВЯЗЕЙ БУКСИРУЕМЫХ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Владимир Аркадьевич Наумов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр., 1
e-mail: van-old@mail.ru

Аннотация

Цель статьи – разработка математической модели для расчета сил гидродинамического сопротивления, действующих на гибкие связи (ГС) подводных буксируемых объектов при произвольной кривизне. Задачи исследования: анализ данных буксировочных испытаний ГС; постановка и решение краевой задачи равновесия ГС в однородном потоке; выявление зависимости коэффициентов сопротивления ГС от их кривизны; оценка возможности линеаризации зависимости силы сопротивления от скорости. Результаты решения краевой задачи равновесия ГС хорошо согласуются с опытными данными по приведенному коэффициенту гидродинамического сопротивления. Выполненные исследования подтвердили гипотезу, что интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейной ГС является убывающей функцией угла провиса. Локальные коэффициенты гидродинамического сопротивления криволинейной ГС необходимы при решении дифференциальных уравнений. Они с достаточной степенью точности определяются коэффициентами сопротивления прямолинейной ГС и углом атаки. Зависимость сил сопротивления ГС от скорости можно линеаризовать при получении передаточной функции, если относительная скорость находится в диапазоне от 0,7 до 1,5.

Ключевые слова: буксируемые объекты, гибкие связи, коэффициент гидродинамического сопротивления, влияние кривизны.

HYDRODYNAMIC DRAG FORCES OF FLEXIBLE CABLES OF TOWED UNDERWATER OBJECTS

Vladimir Naumov

the professor, Dr.Sci.Tech.,
Chairman of The Water Resources & Water Use Department
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy Ave., 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: van-old@mail.ru

Abstract

The purpose of this article was to develop a mathematical model to calculate the hydrodynamic drag forces acting on flexible cables (FC) underwater towed objects with arbitrary curvature. Objectives of the study were: analysis of data from towing tests of FC; formulation and solution of the boundary value equilibrium problem of FC in a homogeneous flow; identifying the dependencies of FC curvature on the drag coefficients; evaluation of the possibility of linearization of the dependence of the drag force to the speed. The results of solving the boundary value problem of equilibrium FC are in good agreement with the experimental data for the normalized hydrodynamic drag coefficient. The performed studies confirmed the hypothesis that the integral drag coefficient of curved FC is a decreasing function of the sagging angle. Local drag coefficients of curved FC are necessary for solving differential equations. They are determined by the hydrodynamic coefficients of rectilinear FC and the attack angle with reasonable degree of accuracy. The dependence of the resistance force FC of the speed can linearize while obtaining transfer functions, if the relative speed is in the range of 0.7 to 1.5.

Key words: towed objects, flexible cables, hydrodynamic drag coefficient, curvature effect.

Введение

Буксируемые подводные объекты (БПО) широко используются в морской индустрии. Тросы, канаты, кабели – гибкие связи (ГС) являются важной частью систем, связывают судно-

носитель и БПО. Математическому моделированию ГС посвящено большое количество трудов (см. [1-3] и библиографию).

От правильного определения сил гидродинамического сопротивления, действующих на ГС,

зависит их форма, натяжения, а, значит, и динамика БПО. В большинстве случаев форма ГС заметно отличается от прямолинейной. Чтобы найти силу лобового сопротивления, действующую на криволинейную ГС, требуется определить интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления C_K :

$$R_x = 0,5 \cdot C_K \cdot \rho \cdot F \cdot V^2, \quad C_K = \int_0^L C_x(s) ds, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, V – скорость, F – характерная площадь, L – длина ГС, s – дуговая координата. Локальный коэффициент гидродинамического сопротивления $C_x(s)$ в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re , местного угла атаки α и других характеристик ГС:

$$Re = V \cdot d / \nu, \quad (2)$$

где d – диаметр ГС, ν – коэффициент кинематической вязкости воды.

Опубликованы результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента C_K от характеристик прогиба [4-6]. Методика испытаний заключалась в том, что образцы ГС буксировались в горизонтальной плоскости на определенной глубине между двумя катерами, движущимися параллельными курсами с постоянной скоростью V . В качестве эквивалентной гидродинамической модели можно принять схему равновесия гибкой нити, закрепленной в двух точках однородного потока (см. рис. 1): φ – угол провиса нити, f – стрела прогиба ГС.

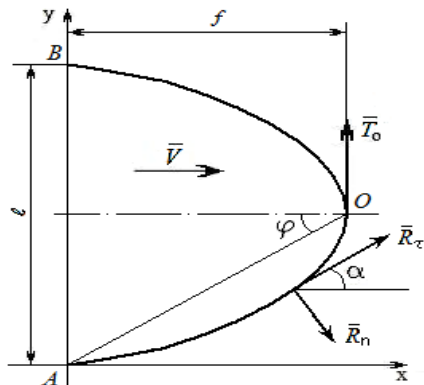


Рис. 1. Схема равновесия криволинейной ГС, закрепленной в двух точках однородного потока

Известны эмпирические формулы зависимости C_K от кривизны ГС. Однако возможности их использования ограничены условиями опытов. В работе [7] была предпринята попытка оценки влияния характеристик кривизны ГС на локальный и интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления. Ограничение малости величины относительной стрелы прогиба ($f_0 = f / \ell$) не позволяет обобщить результаты [7].

Интересная гипотеза была выдвинута в [5]: разброс результатов измерения C_K , в первую очередь, определяется разнообразием характера гидроупругой вибрации ГС, зависящей не только от типа конструкции троса, но и от его конфигурации в потоке и натяжения. К сожалению, ре-

зультаты множественного нелинейного регрессионного анализа [5] нельзя признать достоверными (см. п. 2.3 статьи).

1. Цель и задачи исследования

Цель статьи – разработка математической модели для расчета сил гидродинамического сопротивления, действующих на ГС при произвольной кривизне. Задачами исследования являются:

- анализ данных буксировочных испытаний ГС;
- постановка и решение краевой задачи равновесия ГС в однородном потоке;
- выявление зависимости коэффициентов сопротивления ГС от их кривизны;
- оценка возможности линеаризации зависимости силы сопротивления от скорости.

Полагаем область гидродинамического сопротивления ГС автомобильной.

2. Коэффициенты гидродинамического сопротивления ГС

2.1. Зависимость от угла атаки

Воспользуемся для расчета локального коэффициента лобового сопротивления ГС $C_x(\alpha)$ формулой, которая дает наилучшее согласие с экспериментальными данными при $n = 2,7$:

$$C_R = C_0 + (C_{90} - C_0) \cdot (\sin \alpha)^n. \quad (3)$$

где C_0 , C_{90} – коэффициенты сопротивления ГС большого удлинения при продольном ($\alpha=0$) и поперечном ($\alpha=90^\circ$) обтекании, соответственно.

Локальный коэффициент подъемной силы будем вычислять, как в [6, 7]:

$$C_{\text{ПС}} = C_{90} \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Наибольшая неопределенность в настоящее время по. В [6, 8] приведены формулы вычисления боковой силы, действующей на тросы:

$$C_b = b_0 \cdot \sin^3 \alpha \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

$$C_b = b_1 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + b_2 \cdot \sin^3 \alpha \cdot \cos \alpha, \quad (6)$$

где b_0 , b_1 , b_2 – эмпирические коэффициенты, величины которых отличаются у трехрядных и шестипрядных тросов, а знак зависит от направления свивки.

Результаты расчетов по формулам (5)-(6) дают одинаковый порядок величин, но отличаются по углам атаки. В лабораторных опытах, выполненных в КГТУ, получились заметно меньшие значения C_b . Необходимы дальнейшие исследования. Впрочем, из-за симметрии принятой схемы (рис. 1), в рассматриваемых условиях влияние боковой силы невелико, им можно пренебречь.

2.2. О линеаризации зависимости гидродинамической силы от скорости

При математическом моделировании движения БПО используются ([1, 9] и др.) методы теории автоматического управления (ТАУ). В отдельных работах для вывода передаточной функции используется линеаризация зависимости силы сопротивления ГС от скорости $R(V)$. Так авторы [1, с. 33] полагают, что «достаточная для

практических целей точность оценки влияния трения троса о воду может быть получена при замене квадратичной зависимости линейной»:

$$R_2 = 0,5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot V^2 \rightarrow R_1 = 0,5 \cdot C_\tau \cdot \rho \cdot d \cdot V. \quad (7)$$

Причем коэффициент C_τ не меняется (заметьте, что при этом коэффициент C_0 становится размерным, м/с). Возникающая при этом погрешность расчета ε с уменьшением скорости только растет и становится огромной.

Можно выполнить линейризацию, как в ТАУ:

$$R_d(V) = R_2(V_0) + R'_2(V_0) \cdot (V - V_0), \quad (8)$$

где V_0 – характерное (например, равновесное) значение скорости. Введем безразмерную скорость $v = V/V_0$. Тогда погрешность линейризации по (8) будет равна (рис. 2):

$$\varepsilon_d(v) = (1 - 2/v + v^{-2}) \cdot 100\%. \quad (9)$$

По рис. 3 относительная погрешность линейризации не превышает 10 %, если относительная скорость находится в диапазоне от 0,7 до 1,5.

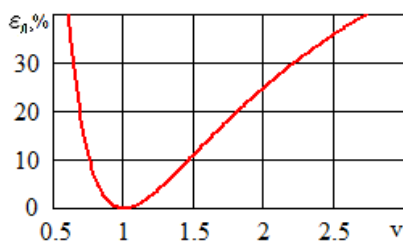


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности линейризации силы (8) от безразмерной скорости

2.3. Анализ данных буксировочных испытаний

В [5] были использованы данные буксировочных испытаний на Ладожском озере. Испытаниям подвергались стальные тросы: два трехрядных троса и три шестирядных диаметром d от 10,2 до 14 мм, длиной L от 108 до 200 м. Тросы буксировались в горизонтальной плоскости на глубине 0,5 м. Скорость буксировки изменялась от 1,8 до 3,3 м/с. В ходе экспериментов измерялись начальное натяжение T_A , начальный угол атаки α_A , расстояние между катерами.

В [5] предложено интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейного троса C_K представить в виде:

$$C_K = C_{90}^0 + \Delta C_K, \quad C_{90}^0 = 1,2, \quad (10)$$

где C_{90}^0 – гидродинамического сопротивления цилиндра при поперечном обтекании, добавочное сопротивление ΔC_K обусловлено кривизной троса и другими условиями буксировки ГС.

В качестве аргументов были выбраны безразмерных комплексы из параметров, измеренных в процессе опытов [5]:

$$X_1 = 1/\sin \alpha_A, \quad X_2 = L \cdot k / T_A, \quad X_3 = L / \ell. \quad (11)$$

На основании проведенного множественного регрессионного анализа в [5] утверждается, что ΔC_K с высокой точностью аппроксимируется многочленом второго порядка от аргументов (X_1 , X_2 , X_3). Обратим внимание, что и аргумент X_1 , и X_3 характеризуют форму искривленного троса. Про-

веденная проверка показала, что коэффициент парной корреляции между ними $r(X_1, X_3) > 0,9$ (см. рис. 3). Поэтому один из названных аргументов должен быть исключен из рассмотрения.

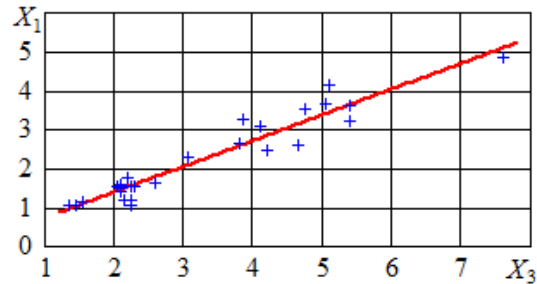


Рис. 3. Связь между безразмерными аргументами коэффициента сопротивления в [5]: точки – опытные данные, линия – уравнение линейной регрессии

С другой стороны, $r(X_2, \Delta C_K) < 0,3$; влияние X_2 на ΔC_K нельзя считать значимым. С достаточной степенью достоверности можно утверждать о зависимости дополнительного сопротивления ГС от одного аргумента: $\Delta C_K(X_1)$ или $\Delta C_K(X_3)$. Следовательно, исследование опытных данных [5] нельзя считать завершенным.

На рис. 4 и 5 представлены результаты буксировочных испытаний, опубликованные в [4, 6]. На первый взгляд, поведение кривых на рис. 4 и 5 различается не только количественно, но и качественно. Однако следует учесть, что в первом случае в качестве определяющей площади принято произведение длины хорды AB на диаметр троса d :

$$C_e = R_x / (k \cdot \ell), \quad k = \frac{1}{2} \rho \cdot d \cdot V^2. \quad (12)$$

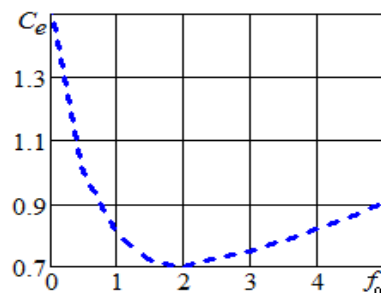


Рис. 4. Интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейной ГС [6]

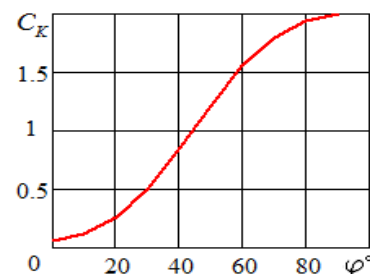


Рис. 5. Интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейной ГС [4]

Для интерпретации зависимостей на рис. 5 и 6, сформулируем краевую задачу равновесия ГС в однородном потоке.

3. Краевая задача равновесия ГС

3.1. Математическая постановка задачи

Как показано на рис. 1, ось Ox направим по вектору скорости движения V , ось Oz – вертикально вверх, а горизонтальная ось Oy дополняет правую тройку ортогональных осей. Для описания локальных сил, действующих на элемент ГС, используем полусвязанную систему (τ, n, b) .

В рассматриваемых условиях безразмерная система дифференциальных уравнений равновесия ГС будет иметь вид [7]:

$$\tau \cdot \frac{d\alpha}{d\sigma} + (P(\alpha) + \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \alpha = 0, \quad (13)$$

$$\frac{d\tau}{d\sigma} - (P(\alpha) - \sin^3 \alpha) \cdot \cos \alpha = 0, \quad (14)$$

$$\frac{dx}{d\sigma} = -\cos \alpha, \quad \frac{dy}{d\sigma} = -\sin \alpha. \quad (15)$$

$$P(\alpha) = \chi + (1 - \chi) \cdot (\sin \alpha)^{2.7}, \quad \chi = C_0 / C_{90}. \quad (16)$$

В формулах (10)-(13) безразмерные переменные $x = X/L$, $y = Y/L$, $\sigma = s/L$, $\tau = T/(L \cdot k \cdot C_{90})$.

Знак минус в (15) обусловлен противоположным направлением отсчета координат X , Y и дуговой координаты s . Симметрия позволяет искать решение только на дуге OA . Кроме системы уравнений, постановка задачи включает граничные условия: значения угла атаки и силы натяжения в точке O , координаты точки A

$$\alpha(0) = \pi/2, \quad \tau(0) = \tau_0; \quad x(0,5) = 0, \quad y(0,5) = 0. \quad (17)$$

3.2. Результаты расчета

Краевая задача (13)-(17) решалась численным методом в среде Mathcad. Результаты расчета формы ГС при различных значениях τ_0 на рис. 6. Чтобы сравнить данные экспериментов разных авторов с результатами расчетов, использован приведенный коэффициент сопротивления ГС, величина которого изменяется от 0 до 1:

$$ck = (C_K - C_0) / (C_{90} - C_0). \quad (18)$$

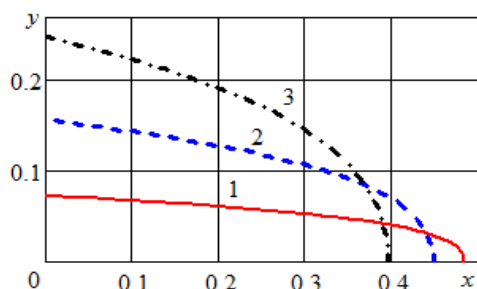


Рис. 6. Результаты расчета формы ГС: 1 – $\tau_0 =$

0,04; 2 – $\tau_0 = 0,12$; 3 – $\tau_0 = 0,3$

На рис. 7 результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными, пересчитанными в координатах φ – ck . Видно их хорошее согласие.

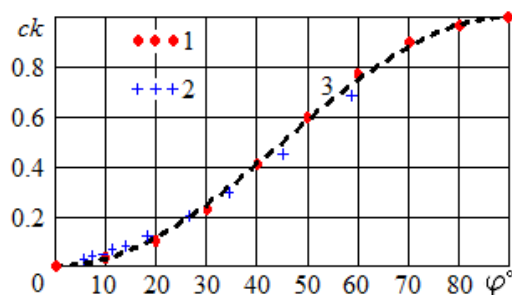


Рис. 7. Приведенный коэффициент лобового сопротивления ГС в зависимости от угла провиса:

1 – данные опытов [6], 2 – [4], 3 – результаты расчета

3.3. Влияние растяжения ГС в равновесии

Как правило, упругость ГС учитывают при математическом моделировании продольных колебаний [1, 4, 9], растяжением ГС в расчетах формы и сил натяжения в условиях равновесия пренебрегают. Именно в такой постановке решена краевая задача в п.3.1-3.2.

В [10] было рассмотрено равновесие каната в однородном потоке с учетом эластичности. Результаты расчета для канатов из полипропилена, полистила и полиамида показали, если скорость течения не превышает 1 м/с, а стрела прогиба нерастянутого каната составляет более 10 % расстояния между точками крепления каната, то с погрешностью менее 5 % не нужно учитывать упругие свойства.

При небольших значениях стрелы прогиба было получено существенное влияние эластичности каната на результаты расчета. Это влияние усиливается при уменьшении диаметра каната и увеличении скорости течения. Расчет силы натяжения канатов из полимерных материалов без учета эластичности при $f_0 < 0,01$ может привести к погрешности более 300 % [10].

Численное решение системы уравнений равновесия стальных тросов при малой стреле прогиба также показало влияние характеристик упругости. Степень такого влияния зависит от типа и диаметра тросов, материала, длительности и условий эксплуатации.

Заключение

Результаты решения краевой задачи равновесия ГС хорошо согласуются с опытными данными по приведенному коэффициенту сопротивления. Интегральный коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейной ГС является убывающей функцией угла провиса.

Локальные коэффициенты сопротивления криволинейной ГС, необходимые при решении дифференциальных уравнений с достаточной степенью точности определяются коэффициентами сопротивления прямолинейной ГС (C_0 , C_{90}) и углом атаки.

Относительная погрешность линеаризации зависимости силы сопротивления ГС от скорости методом ТАУ регулирования не превышает 10 %, если относительная скорость находится в диапазоне от 0,7 до 1,5.

Необходимо продолжить экспериментальные и теоретические исследования влияния гидроупругой вибрации и жесткости ГС на их форму и силы натяжения

Литература

1. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В. Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 285 с.
2. Vineet K.S., Yvss S., Mohammad T. Dynamic behavior of underwater towed-cable in linear profile. *Int. Journal of Scientific & Engineering Research*. 2011. V. 2, No. 7. P. 1-10.
3. Трунин К.С. Уравнения динамики элемента гибкой связи морской привязной системы // Сб. науч. тр. Национального университета кораблестроения. Николаев. 2017. № 1. С. 18-25.
4. Белов В.А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных конструкций. Калининград: КГТУ, 2000. 201 с.
5. Лев И.Г., Виноградов Н.И., Нисневич М.З. Об определении коэффициентов гидродинамического сопротивления и оценке характеристик вибрации плохообтекаемых гибких связей по данным морских испытаний // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2010. Т. 3, № 2. С. 68-84.
6. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. Москва.: Моркнига, 2011. 527 с.
7. Ахмедов И.М., Наумов В.А. Коэффициент гидродинамического сопротивления криволинейного каната // *Известия КГТУ*. 2015. № 38. С. 53-60.
8. Габрюк В.И., Кулагин В.Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика. – М.: Колос, 2000. 416 с.
9. Блинцов О.В., Чан Там Дык. Система автоматического управления специализированным морским комплексом с буксируемым подводным аппаратом // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 5/4 (65). С. 23-27.
10. Наумов В.А., Ахмедов И.М. Расчет формы и усилий в канатах с учетом их эластичности // *Известия КГТУ*. 2016. № 40. С. 159-166.

References

1. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Chupina K.V. Sistemy upravleniya glubinoi pogruzheniya buksiruemykh ob"ektov [Control systems of the immersion depth of the towed objects] Vladivostok: Dal'nauka, 2005. 285 p.
2. Vineet K.S., Yvss S., Mohammad T. (2011) Dynamic behavior of underwater towed-cable in linear profile. *Int. Journal of Scientific & Engineering Research*. V. 2, No. 7, pp. 1-10.
3. Trunin K.S. (2017) Uravneniya dinamiki elementa gibkoy svyazi morskoy privyaznoy sistemy [The dynamic equation of the element flexible coupling marine harness system]. *Sb. nauch. tr. Natsional'nogo universiteta korablestroeniya. Nikolaev*. No 1, pp. 18-25.
4. Belov V.A. *Gidrodinamika nitey, setey i setnykh konstruksiy* [Hydrodynamics of threads, nets and netting structures]. - Kaliningrad: KGTU, 2000. 201 p.
5. Lev I.G., Vinogradov N.I., Nisnevich M.Z. (2010) Ob opredelenii koeffitsientov gidrodinamicheskogo soprotivleniya i otsenke kharakteristik vibratsii plokhootekaemykh gibkikh svyazey po dannym morskikh ispytaniy [Concerning the determination of the drag hydrodynamic coefficients and evaluation of the vibration characteristic prohealthcare flexible connections according to the sea trial]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. V. 3, No 2, pp. 68-84.
6. Rozenshteyn M.M., Nedostup A.A. *Mekhanika orudiy rybolovstva* [The mechanics of fishing gears]. Moscow: Morkniga, 2011. 527 p.
7. Akhmedov I.M., Naumov V.A. (2015) Koeffitsient gidrodinamicheskogo soprotivleniya krivolineynogo kanata [The hydrodynamic drag coefficient of curvilinear rope]. *Izvestiya KGTU*. No 38, pp. 53-60.
8. Gabryuk V.I., Kulagin V.D. *Mekhanika orudiy rybolovstva i ARM promyslovika* [The mechanics of fishing gears and AWP fishers]. Moscow: Kolos, 2000. 416 p.
9. Blintsov O.V., Chan Tam Dyk (2013) Sistema avtomaticheskogo upravleniya spetsializirovannym morskim kompleksom s buksiruемым podvodnym apparatom [System of automatic control of a specialized marine complex with a towed underwater vehicle]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. No 5/4 (65), pp. 23-27.
10. Naumov V.A., Akhmedov I.M. (2016) Raschet formy i usiliy v kanatakh s uchetom ikh elastichnosti [The calculation form and effort in the ropes with regard to their elasticity]. *Izvestiya KGTU*. No 40, pp. 159-166.

УДК 551.510.535

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Владимир Васильевич Медведев

доктор физико – математических наук,
профессор кафедры информатики и информационных технологий
ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Виктория Евгеньевна Еремичева

доцент кафедры информатики и информационных технологий
ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: viksik@mail.ru

Ирина Витальевна Тимофеева

доцент кафедры информатики и информационных технологий
ФГБОУ ВО «Калининградский технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: ivt0610@mail.ru

Аннотация

В статье представлена постановка задачи и метод ее решения, предназначенные для получения высотного распределения концентрации атомарного кислорода [O] в труднодоступной и малоизученной области верхней мезосферы и нижней атмосферы, в диапазоне высот 80 – 130 км.

Результаты получены методом численного интегрирования уравнения непрерывности с учетом динамических процессов: турбулентного перемешивания, конвективного и среднемассового переноса, молекулярной диффузии и конвективного переноса. В уравнении также учтены фотохимические процессы.

Расчеты основаны на методе конечных разностей, способом прогонки, для этого построена необходимая разностная схема и приведен метод решения.

Рассчитанное предложенной математической моделью высотное распределение [O] сравнивается с модельными результатами [O], вычисленными на основе эмиссии атомарного кислорода 557,7 нм в ночное время. Результаты находятся в удовлетворительном согласии.

Ключевые слова: фотохимические процессы, турбулентная диффузия, конвективный перенос, уравнение непрерывности, мезосфера, нейтральные компоненты.

RESULTS OF NUMERICAL CALCULATION OF ALTITUDE DISTRIBUTION OXYGEN COMPONENTS OF THE UPPER ATMOSPHERE OF THE EARTH

Vladimir Medvedev

Dr. Sci. Phys.-Math.
the professor of department of Informatics and Information technologies
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: vmedvedev2012@mail.ru

Viktoriia Eremicheva

associate professor of department of Informatics and Information technologies
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: viksik@mail.ru

Irina Timofeeva

associate professor of department of Informatics and Information technologies
Kaliningrad State Technical University
Sovetskiy prospect, 1, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: ivt0610@mail.ru

Abstract

The article presents the formulation of the problem and the method for solving it designed to obtain altitudinal distribution of atomic oxygen [O] in remote and poorly studied region of the upper mesosphere and lower atmosphere in the altitude range of 80 - 120 kilometers. The results have been obtained by using the method of numerical integration of the continuity equation taking into account dynamic processes: turbulent mixing, convective and bulk transfer, molecular diffusion and convective transfer. Photochemical processes are also included in this equation.

Calculations are based on the method of finite differences, method of run for which the required difference scheme has been made and the method of solution has been given.

The altitudinal distribution of [O], obtained by the proposed mathematical model, is compared with the model results of [O] which are calculated on the basis of the emission of atomic oxygen 557,7 nm at night. The results are in satisfactory agreement.

Key words: photochemical processes, turbulent diffusion, convective transport, continuity equation, mesosphere, neutral components

Введение

Роль атомарного кислорода в различных динамических и фотохимических процессах является определяющей. Исследования различного рода свечения атмосферы в области высот 80 – 130 км и его объяснение с использованием высотного распределения [O], а также обратная задача, указывают на необходимость получения надежных данных [O] как в теоретическом, так и в экспериментальном плане [1 – 5]. Цель данной работы – сравнение и анализ результатов по высотному распределению [O] в указанном диапазоне высот, полученных оптическими методами и методами вычислительного эксперимента [6 – 7].

1. Постановка математической задачи

Пространственно-временное распределение нейтральных компонентов с учётом вертикального переноса описывается уравнением непрерывности, имеющим следующий вид:

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = P_j - L_j - \frac{\partial(n_j V_{jz})}{\partial z}, \quad (1)$$

где n_j - концентрация j -ой нейтральной компоненты ($j=1,2,3$), P_j , L_j - члены, учитывающие образование и потери j -ой нейтральной компоненты в фотохимических реакциях, V_{jz} - вертикальная скорость j -ой нейтральной компоненты.

В общем случае, V_{jz} является суммой трёх составляющих:

$$V_{jz} = V_z^{(M)} + V_{jz}^{(m)} + V_{jz}^{(T)}, \quad (2)$$

где $V_z^{(M)}$ - макроскопическая скорость атмосферы, $V_{jz}^{(m)}$, $V_{jz}^{(T)}$ - скорости, обусловленные молекулярной диффузией и турбулентными процессами соответственно и имеют вид:

$$V_{jz}^{(m)} = D_j \left(\frac{\partial n_j}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + V_j^{(M)} + \frac{1}{H_j} \right) n_j, \quad (3)$$

$$V_{jz}^{(T)} = D_T \left(\frac{\partial n_j}{\partial z} \right) + \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} + V_j^{(M)} + \frac{1}{H_T} \right) n_j. \quad (4)$$

В формулах (2) - (4) использованы следующие обозначения:

$$V_j^M = \sum_{e \neq j} S_{je} n_e V_e / \sum_{e \neq j} S_{je} n_e, S_{je} = \frac{16 \mu_{je}}{3} \frac{\sigma_{je}^2}{m_j} \sqrt{\frac{\pi k T}{2 \mu_{je}}}$$

$H_j = kT / m_j g$, $H_T = kT / \bar{m} g$, где k – постоянная

Больцмана, $D_j = \frac{kT}{m_j \sum_{e \neq j} S_{je} n_e}$ - коэффициент мо-

лекулярной диффузии, $\sigma_{je} = \frac{\sigma_j + \sigma_e}{2}$ - средний

диаметр молекулы ($\sigma_{je} \approx 3 \cdot 10^{-8}$ см), σ_j и σ_e – диа-

метр молекул, $\mu_{je} = \frac{m_j m_e}{m_j + m_e}$, $\bar{m} = \frac{\sum_e m_e n_e}{\sum_e n_e}$ -

средняя масса молекулы, m_j , m_e – масса молекул, g – ускорение свободного падения, D_T – коэффициент турбулентной диффузии (задается эмпирически), T – температура нейтрального газа.

Формула (2) для скорости молекулярной диффузии выводится из уравнения движения для нейтрального газа с учётом только сил давления, гравитации и трения "нейтрал – нейтрал". Выражения для скоростей турбулентной диффузии (3) – (4) записываются по аналогии с выражением (2).

Макроскопическая скорость может иметь порядок, равный порядку скорости молекулярной диффузии, и даже превосходить его, например, для зимних условий в полярных областях. Наблюдаются существенные сезонные различия в величинах макроскопической вертикальной скорости атмосферы, обусловленной глобальной системой циркуляции: так, для летнего периода эти скорости по абсолютной величине не превышают 0,5 см/с, в то время как для зимнего сезона максимальное значение составляет 4 см/с.

Перенос, обусловленный $V_z^{(M)}$, оказывает значительное влияние на величину концентрации нейтральных компонентов.

Система уравнений для скорости запишется в виде:

$$\frac{\partial V_j}{\partial t} = \frac{1}{1 + V_2 f(\varphi)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_j}{\partial z} \right) - \right.$$

$$\left. -V_3 \frac{\partial V_j}{\partial z} - \frac{V_j}{\rho} \sum_e n_e R_e + f_j \right\}, j=1, 2, 3. \quad (5)$$

Система уравнений (5) является связанной и нелинейной.

Трудность проблемы решения (5) состоит в том, что коэффициент V_3 является функцией от x, y, z, t , которая меняет знак в области определения решения.

Для численного решения (5) введем равномерную сетку:

$$\omega = \{x_i = x_0 + i \cdot h, t_N = k \cdot \tau, i = \overline{0, N}\},$$

где $h = (x_N - x_0) / N$, x_0, x_N, t_N - граничные значения.

Запишем разностную схему:

$$\frac{\hat{y}_i - y_i}{\tau} = \frac{1}{1 + (y_2 f(\varphi))_i} \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \frac{\hat{y}_{i+1} - 2\hat{y}_i + \hat{y}_{i-1}}{h^2} - (y_3)_i \frac{\hat{y}_{i+1} - \hat{y}_{i-1}}{2h} - \left(\frac{1}{\rho} \sum_e n_e R_e \right)_i \hat{y}_i - f_i \right]. \quad (6)$$

Здесь индекс j опущен, τ и h - шаги разностной сетки по времени и пространственной переменной, $y_i = y_i^{k+1}$, $f_i = f_i^k$, где k - номер временного слоя, i - номер узла по пространственной переменной.

Уравнение (6) приводится к системе алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$A_i^s \hat{y}_{i+1}^s - C_i^s \hat{y}_i^{s+1} + B_i^s \hat{y}_{i-1}^{s+1} = -F_i^s, \quad (7)$$

$$A_i^s = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} - (y_3)_i \frac{1}{2h} \right] \frac{1}{(1 + y_2 f(\varphi))_i}, \quad (8)$$

$$B_i^s = \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} + (y_3)_i \frac{1}{2h} \right] \frac{1}{(1 + y_2 f(\varphi))_i}, \quad (9)$$

$$C_i^s = \frac{1}{T} + \left[\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \frac{1}{h^2} + \left(\frac{1}{\rho} \sum_e n_e R_e \right)_i \right] \frac{1}{(1 + y_2 f(\varphi))_i}, \quad (10)$$

$$F_i^s = (f_i)_i \frac{1}{(1 + y_2 f(\varphi))_i} + \frac{y_i}{T}. \quad (11)$$

Так как система (7) - (11) является нелинейной, то для ее решения необходимо проводить линеаризацию. В данной работе линеаризация проводилась путем расчета коэффициентов по значениям неизвестной функции с предыдущего временного слоя. После линеаризации линейная относительно y_i система разностных уравнений, дополненная краевыми условиями, решалась методом прогонки:

$$\hat{y}_{i-1}^{s+1} = a_i^s \hat{y}_i^{s+1} + b_i^s, \quad (12)$$

где $i = N, \dots, 1$, s - номер итерации.

Процесс прогонки численно устойчив, если выполняется условие монотонности $A_i > 0$, $B_i > 0$, $C_i > A_i + B_i$, или $a_i < 1$.

2. Результаты расчета

В данной работе приведены результаты расчетов высотного распределения $[O]$ и $[O_2]$ различными вариантами метода прогонки: обыкновенной, немонотонной, с заменой переменной (которая обеспечивает условие консервативности), матричной и потоковой. Для всех вариантов задавались одинаковые значения рассчитываемых концентраций на верхней и нижней границах. Решения получены методом установления.

Результаты $[O]$ и $[O_2]$, полученные различными вариантами метода прогонки, находятся в хорошем согласии между собой.

Из близости полученных результатов можно заключить, что, несмотря на нарушение некоторых схем достаточных условий устойчивости метода прогонки (условий монотонности), необходимые условия выполнены, и большого накопления погрешности при $a_i > 1$ не наступает.

Этот результат, однако, не гарантирует устойчивости для немонотонных схем при любых моделируемых геофизических ситуациях. Ввиду того, что все дальнейшие расчеты проводились для спокойных условий, то есть не рассматривались различные "экзотические" случаи, при которых возможно нарушение необходимых условий устойчивости, в расчетах использовался метод обыкновенной прогонки.

Важным параметром в экспериментах является измеряемое отношение O/O_2 . Расчеты этого отношения для различных значений коэффициента турбулентного перемешивания D_T приведены в таблице 1.

Поскольку численные методы решения дали удовлетворительные результаты, проведено сравнение результатов, полученных в предложенной математической модели [7], с результатами расчетов на основе оптических измерений в модели [1] (рис.1).

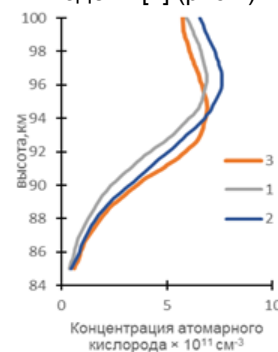


Рис. 1. Высотное распределение $[O]$: 1 и 2 - модель [1]; 3 - модель [7]

Из рис.1 очевидно, что расчетные данные в предложенной модели [7] (линия 3) находятся в удовлетворительном согласии с расчетными данными в модели [1] (линии 1 и 2).

Таким образом, численные результаты высотного распределения по предложенной модели и результаты, полученные по свечению атмосферы на основе эмиссии [O] с длиной волны 557,7 нм в находятся в удовлетворительном согласии, что может говорить о правильности построенной модели.

Заключение

В данной работе представлены результаты расчетов высотного распределения [O], удовлетворительно совпадающие с модельными результатами в [1]. Тем самым показано, что предложенная математическая модель может быть использована в дальнейших исследованиях, а полученное высотное распределение [O] – в качестве контрольного примера для модели.

Таблица 1

Расчет O/O_2 для различных значений коэффициента турбулентного перемешивания D_T

Высо-та (км)	120			150		max(O)
Отно-шение	O/O_2	O/N_2	O_2	O/O_2	O_2	
Период Темпера-тура (K) / D_T	Лето					
$T=900K$	2,5	0,47	$6 \cdot 10^{10}$	20	$1,9 \cdot 10^{10}$	94-96
$T=1100K$	1,3	0,33	$7,5 \cdot 10^{10}$	6	$2,8 \cdot 10^{10}$	94-96

Литература

- Семенов А.И. Модель вертикального распределения концентрации атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней термосферы / Семенов А.И., Шефов Н.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45. - №6. – С.844 – 855.
- Янковский В.А. Восстановление содержания озона в мезосфере на основе новой модели электронно – колебательной кинетики продуктов фотолиза O_3 и O_2 . / Янковский В.А., Кулешова В.А., Мануйлова Р.О., Семенов А.О. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т.43. - №4. – С.557 – 569.
- Толмачева А.В. Результаты измерений атомарных параметров с помощью искусственных периодических неоднородностей с разными пространственными масштабами / Толмачева А.В., Беликович В.В., Калинина Е.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т.49. - №2. – С.254 – 261.
- Полуаршинов М.А. Модельные оценки величин волновых возмущений светимости эмиссионного слоя, регистрируемых с космического аппарата в окрестности солнечного терминатора / Полуаршинов М.А. // Геомагнетизм и аэрономия – 2014. – Т.54. - №6. – С.842 – 850.
- Семенов А.И. Эмпирическая модель вариации эмиссии континуума верхней атмосферы. 1. Интенсивность/ Семенов А.И., Шефов Н.Н., Медведева И.В. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т.54. - №4. – С.528 – 539.
- Medvedev V.V. Mathematical Model for the Processes Ionosphere and Upper Atmosphere / Medvedev V.V., Pyalov D.I., Zamyatina O.V. // AIS-2010: Atmosphere, ionosphere, safety: book of Abstracts; Supported by Russian Foundation of Basic Research. - Kaliningrad, 2010. - pp. 225-226.
- Medvedev V.V. Mathematical modelling for the processes mesosphere, thermosphere and ionosphere / Medvedev V.V., Zamyatina O.V. // Physics of Auroral Phenomena 34th Annual Seminar Polar Geophysical Institute. - Apatity, 2011. - p. 49.

References

1. Semenov A.I. Model' vertikal'nogo raspredeleniya kontsentratsii atomarnogo kisloroda v oblasti menopauzy i nizhney termosfery / Semenov A.I., Shefov N.N. // Geomagnetizm i aeronomiya. 2005. T. 45(6). S.844 – 855.
2. Yankovsiy V.A. Vosstanovlenie sodержaniya ozona v mezosfere na osnove novoy modeli elektronno – kolebatel'noy kinetiki produktov fotoliza O3 i O2. / Yankovskiy V.A., Kuleshova V.A., Manuylova R.O., Semenov A.O. // Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2007. T.43(4). S.557 – 569.
3. Tolmacheva A.V. Rezul'taty izmereniy atomarnykh parametrov s pomoshch'yu iskusstvennykh periodicheskikh neodnorodnostey s raznymi prostranstvennymi masshtabami / Tolmacheva A.V., Belikov V.V., Kalinina E.E. // Geomagnetizm i aeronomiya. 2009. T.49(2). - №2. S.254 – 261.
4. Poluarshinov M.A. Model'nye otsenki velichin volnovykh vozmushcheniy svetimosti emissionnogo sloya, registriruemykh s kosmicheskogo apparata v okrestnosti solnechnogo terminatora / Poluarshinov M.A. // Geomagnetizm i aeronomiya. 2014. T.54(6). S.842 – 850.
5. Semenov A.I. Empiricheskaya model' variatsii emissii kontinuumu verkhney atmosfery. 1. Intensivnost' / Semenov A.I., Shefov N.N., Medvedeva I.V. // Geomagnetizm i aeronomiya. 2014. T.54(4). S.528 – 539
6. Medvedev V.V. Mathematical Model for the Processes Ionosphere and Upper Atmosphere / Medvedev V.V., Pyalov D.I., Zamyatina O.V. // AIS-2010: Atmosphere, ionosphere, safety: book of Abstracts; Supported by Russian Foundation of Basic Research. - Kaliningrad, 2010. - pp. 225-226.
7. Medvedev V.V. Mathematical modelling for the processes mesosphere, thermosphere and ionosphere / Medvedev V.V., Zamyatina O.V. // Physics of Auroral Phenomena 34th Annual Seminar Polar Geophysical Institute. - Apatity, 2011. - p. 49.

Численные методы и комплексы программ

УДК 639.2.081.117.212, 532.5.011, 519.63

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИКИ РАСПОРНЫХ ТРАЛОВЫХ ДОСОК****Александр Алексеевич Недоступ**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр-т, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Ражев

соискатель кафедры промышленного рыболовства
Калининградский государственный технический университет
236022, Калининград, Советский пр-т, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Аннотация

В статье рассмотрено программное обеспечение, предназначенное для исследования гидродинамики распорных траловых досок в составе разноглубинных траловых систем, входящее в разрабатываемый авторами комплекс программных средств для решения задач моделирования динамики орудий и процессов рыболовства и рыбоводства, на примере двух компьютерных программ «Конструктор крыловидных траловых досок» и «Моделирование гидродинамики траловой доски». Выделены достоинства разрабатываемого программного продукта по сравнению с имеющимися в мире аналогичными программными продуктами.

Погрешность расчетов, полученная при помощи компьютерной программы «Моделирование гидродинамики траловой доски», составляет 5%, что приемлемо для последующего моделирования траловой доски в составе разноглубинной траловой системы. Данные компьютерные программы позволят специалистам-конструкторам траловых систем автоматизировать их проектирование. Это сократит время на подготовку проекта траловой системы, а также обеспечит устойчивое развитие САПР в России в области промышленного рыболовства.

Ключевые слова: трал, траловая доска, моделирование, гидродинамика, уравнения Навье-Стокса, компьютерная программа.

SOFTWARE TO STUDY HYDRODYNAMICS OF THE OTTER DOORS**Alexander Nedostup**

PhD in Technical Sciences, associate professor of the Industrial Fisheries Department
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: nedostup@klgtu.ru

Aleksey Razhev

applicant of the Industrial Fisheries of Department
Kaliningrad State Technical University
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1
e-mail: progacpp@live.ru

Abstract

The article considers software that is designed to study hydrodynamics of the otter doors as parts of mid-water trawl systems, and included in the developed by the authors software complex for solving problems of modeling the dynamics of fishing gear and procedures on the example of two computer programmes "Design tool for wing-shaped trawl doors" and "Modeling of trawl doors hydrodynamics." Advantages of the developed software product are highlighted in comparison with the similar existing software.

The calculation error, obtained with the help of the computer program "Modeling of trawl doors hydrodynamics", is 5%, which is acceptable for the subsequent modeling of the trawl door as part of the mid-water trawl system. These computer programs will allow design experts of trawl systems to auto-

mate their design. This will shorten the time for the preparation of the trawl system project, and will also ensure the sustainable development of CAD in Russia in the field of commercial fishing.

Key words: trawl, trawl door, modeling, hydrodynamics, Navier-Stokes equations, computer programme.

Введение

В настоящий момент в мире существует много программных продуктов для моделирования гидродинамики различных физических систем. Например, FlowVision [1], ANSYS CFD [2], COMSOL Multiphysics [3], и др. Все они рассчитаны на широкий спектр задач.

Использование данных продуктов в конкретных приложениях, а именно для моделирования динамики орудий и процессов рыболовства и рыбоводства требует предварительной их конфигурации, а может быть и создания дополнительных программных модулей расширений (плагинов). К тому же пользовательский интерфейс указанного программного обеспечения не «заточен» под конкретную задачу.

1. Цель и задачи

В связи с вышесказанным авторами статьи поставлена цель разработки комплекса программных средств для решения задач моделирования динамики орудий и процессов рыболовства и рыбоводства.

Далее будут рассмотрены два программных продукта, входящих в комплекс программных средств, применительно к моделированию разноглубинных траловых систем, а именно, распорных траловых досок: «Конструктор крыловидных траловых досок» и «Моделирование гидродинамики траловой доски».

2. Материалы и методы

В состав траловых систем кроме канатно-сетной части входят такие твердые тела как распорные траловые доски (см. рис. 1). Для моделирования влияния распорной траловой доски на разноглубинную траловую систему требуется знать зависимости, связывающие силовые и пространственно-временные характеристики траловой доски, учесть силы гидродинамического сопротивления как при различных положениях траловой доски относительно набегающего потока жидкости, так и при возможных вращательных движениях [4,5].

Для расчета гидродинамических характеристик траловой доски авторами предлагается использовать уравнения гидродинамики (уравнения Навье-Стокса), но не в самом процессе моделирования траловой системы, а перед ним. При этом зависимости сохранять в файле табличной формы для всех возможных состояний траловой доски с заданной пользователем степенью дискретизации. В результате для каждого типа траловой доски создается отдельный файл, который в дальнейшем необходимо загружать в программу моделирования траловой системы.

Для создания табличного файла предназначена компьютерная программа «Моделирование гидродинамики траловой доски». В качестве входных параметров в программе задается файл описания трехмерной модели траловой доски. Данный файл можно создать как в сторонних САПР, так и с помощью разработанной компьютерной программы «Конструктор крыловидных траловых досок».

Кроме файла программа «Моделирование гидродинамики траловой доски» может вычислять зависимости различных характеристик траловой доски, такие как зависимость гидродинамических коэффициентов от углов атаки, крена и дифферента.

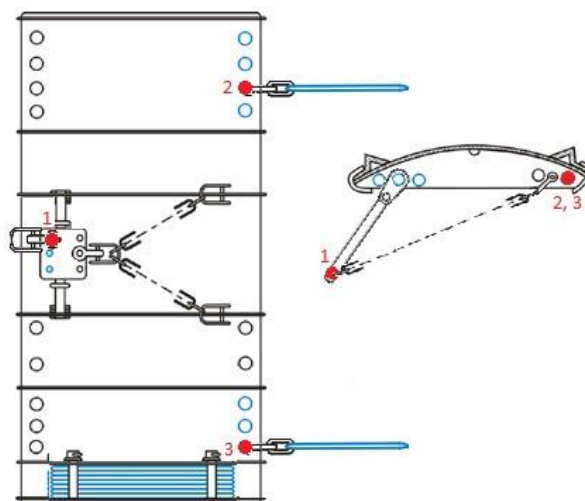


Рис. 1. Крыловидная распорная траловая доска: 1 – точка крепления ваера; 2, 3 – точки крепления лопаток

Для моделирования гидродинамики крыловидной траловой доски в первую очередь необходимо описать ее трехмерную схематическую модель. Для этого была разработана компьютерная программа «Редактор крыловидных траловых досок».

На первом этапе описания (см. рис. 2 обозначения 1) создается профиль и элемент (деталь) щита, и вводятся его параметры: размах щита и хорда.

На втором этапе описания (см. рис. 3 обозначения 2) при наличии у траловой доски предкрылок создаются их профили и элементы, и вводятся их параметры: размах, хорда, положение относительно щита.

На третьем этапе (см. рис. 3 обозначения 3) вводятся характеристики материала доски и килля: массы, плотности. На последнем, четвертом этапе (см. рис. 3 обозначения 4) задаются виртуальные координаты точек крепления ваера (точка 1 на рис. 1) и лопаток (точки 2 и 3 на рис. 1). Этот

этап необходим для последующего моделирования траловой доски в составе траловой системы.

программы «Моделирование гидродинамики траловой доски», показаны на рис. 4 и 5.

3. Результаты

Поля скоростей и давление на поверхности траловой доски, полученные в результате работы

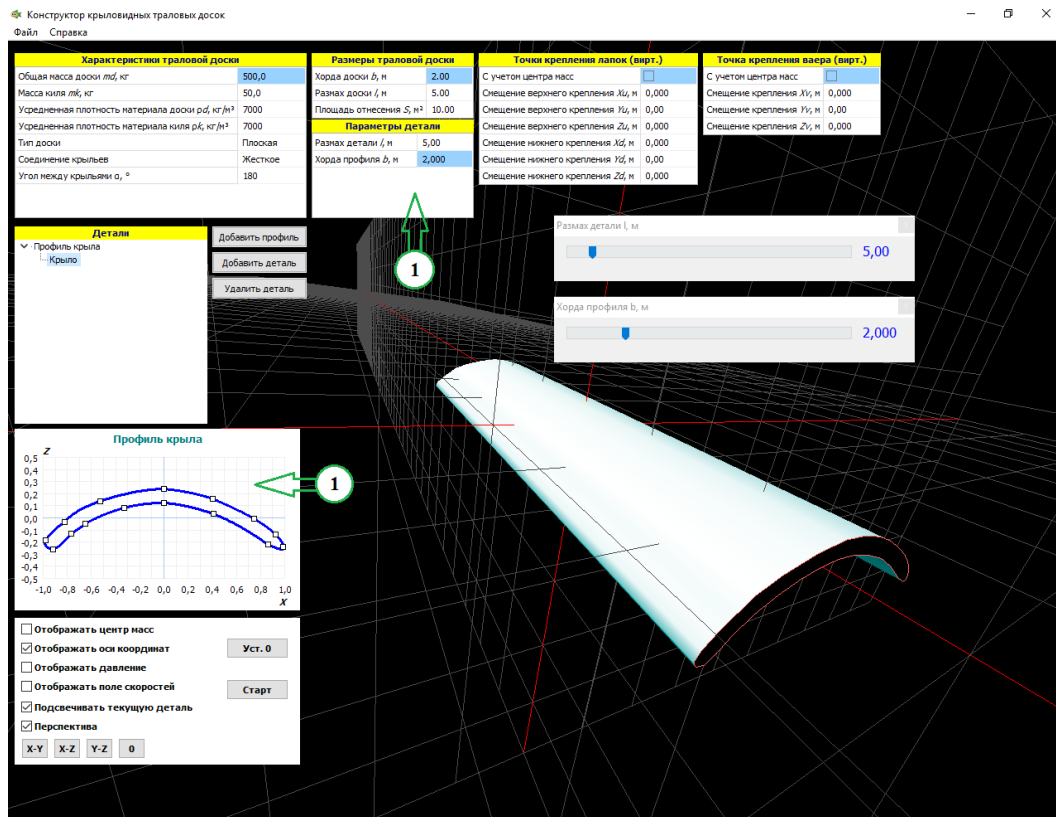


Рис. 2. Компьютерная программа «Конструктор крыловидных траловых досок» (этап 1)

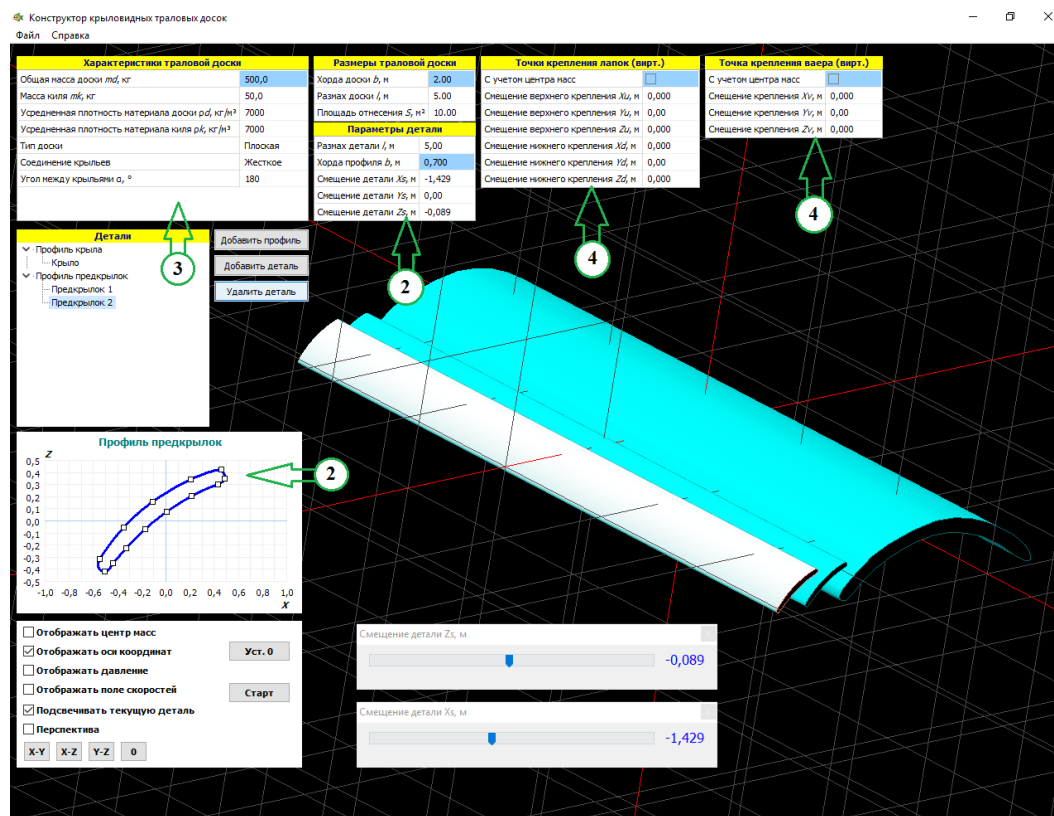


Рис. 3. Компьютерная программа «Конструктор крыловидных траловых досок» (этапы 2-4)

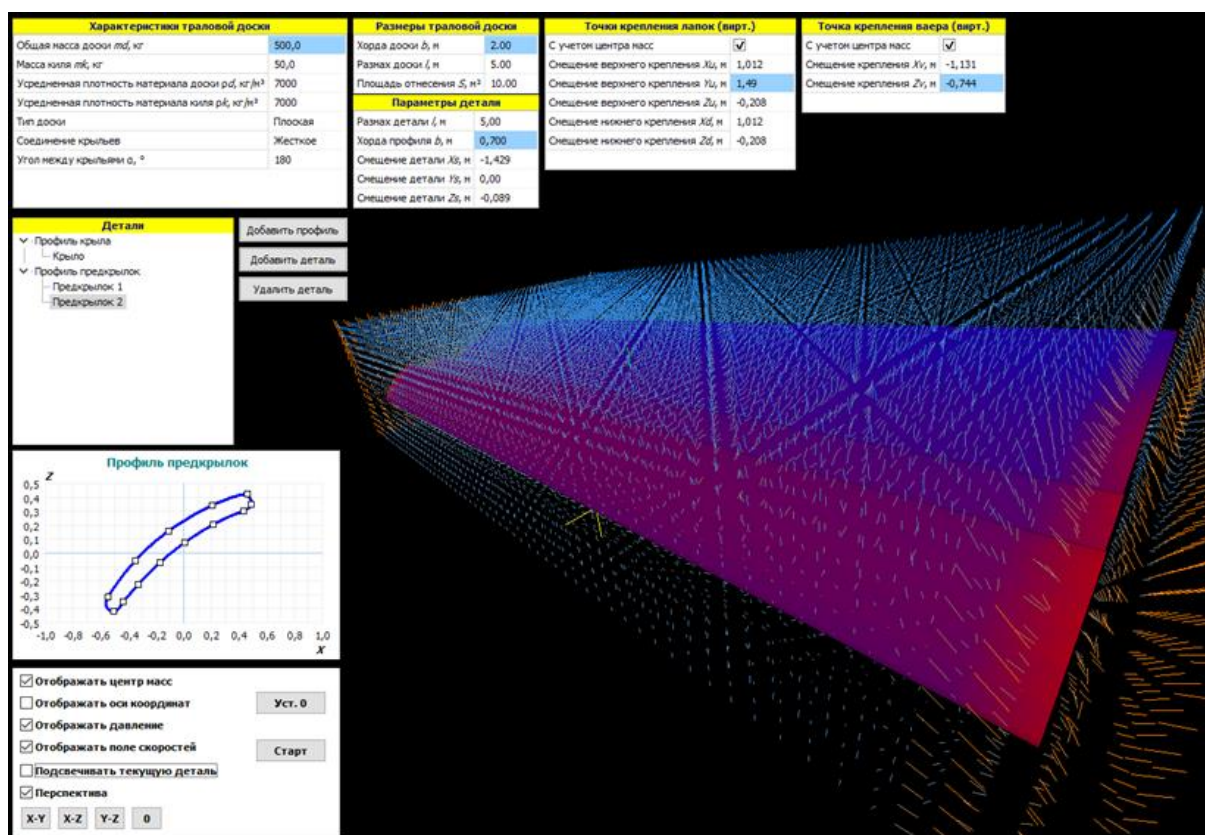


Рис. 4. Компьютерная программа «Моделирование гидродинамики траловой доски» (вид 1)

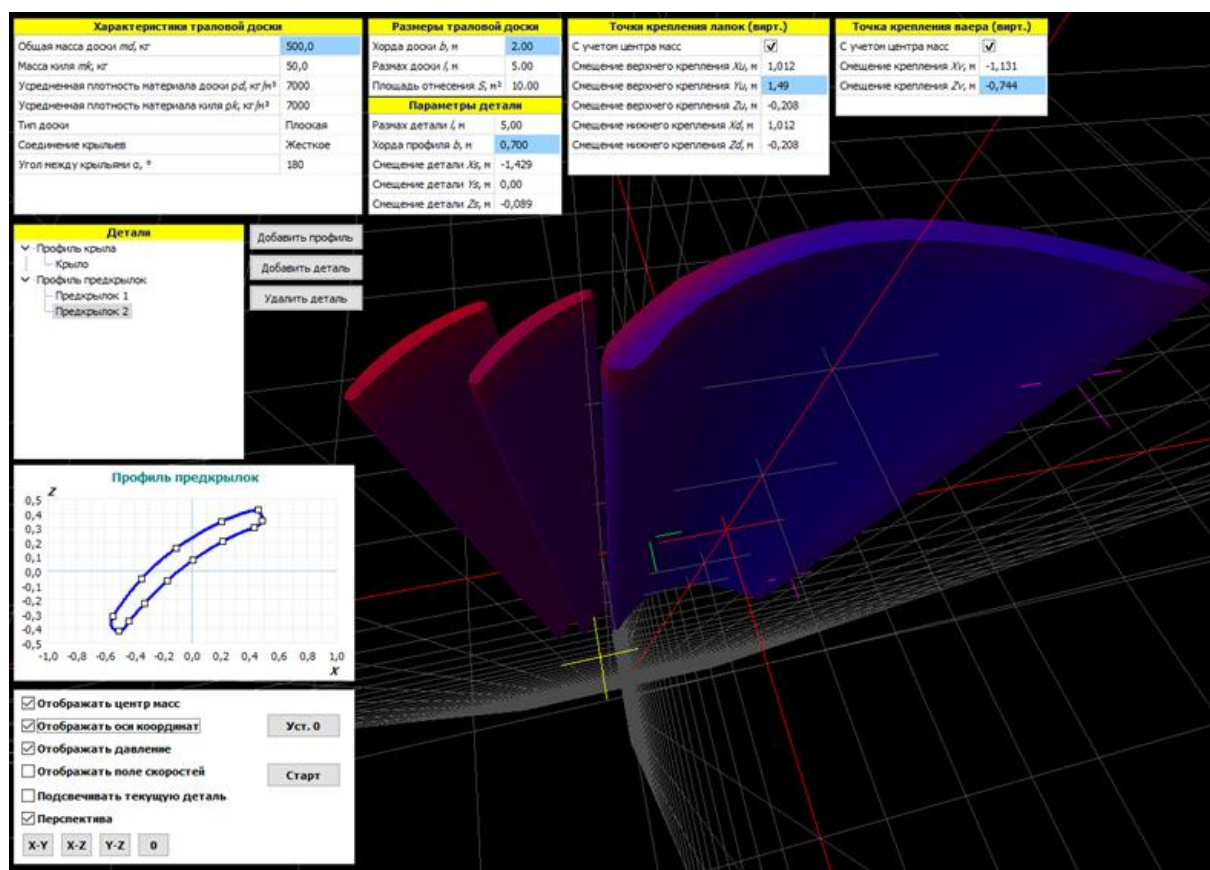


Рис. 5. Компьютерная программа «Моделирование гидродинамики траловой доски» (вид 2)

Заключение

В статье были рассмотрены две компьютерные программы «Редактор крыловидных траловых досок» и «Моделирование гидродинамики траловой доски», предназначенными для моделирования траловых систем и входящие в разрабатываемый авторами комплекс программных средств для решения задач моделирования динамики орудий и процессов рыболовства и рыбоводства.

Результаты расчетов, полученные при помощи компьютерной программы, составляют 5%, что приемлемо для последующего моделирования траловой доски в составе разноглубинной траловой системы.

Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ №15-08-00464-а.

Литература

1. Станов Б., Печенюк А. Применение системы инженерного анализа FlowVision для решения прикладных задач гидродинамики судна // САПР и графика. Ноябрь/2006.
2. Любимов А.К., Шабарова Л.В. Методы построения расчетных сеток в пакете ANSYS ICEM CFD: Электронное методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 25 с.
3. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. Jones & Bartlett Publishers, Inc., 2011, 872 pages.
4. Наумов В.А. Метод расчета гидродинамических коэффициентов траловой доски/ В.А. Наумов, Е.Г. Мейлус// Известия КГТУ. - 2005. - №9. - С. 53-57.
5. Наумов В.А. Расчет гидродинамических коэффициентов макета траловой доски цилиндрического профиля/ В.А. Наумов, Е.Г. Мейлус// Промышленное рыболовство: сборник научных трудов/ КГТУ. – Калининград. - 2004. - С. 34-40.

References

1. Stanov B., Pechenyuk A. Primenenie sistemy inzhenernogo analiza FlowVision dlya resheniya prikladnykh zadach gidrodinamiki sudna [Application of the FlowVision engineering analysis system for solving the applied problems of ship hydrodynamics]. SAPR i grafika. Noyabr. 2006.
2. Lyubimov A.K., Shabarova L.V. Metody postroyeniya raschetnykh setok v pakete ANSYS ICEM CFD [Methods for constructing computational grids in the ANSYS ICEM CFD package]: Elektronnoye metodicheskoe posobie. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2011. 25 s.

-
3. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. Jones & Bartlett Publishers, Inc., 2011, 872 pages.
 4. Naumov V.A. Metod rascheta gidrodinamicheskikh koeffitsientov tralovoy doski [Method for calculating hydrodynamic coefficients of the trawl door]. V.A. Naumov, E.G. Meylus. Izvestiya KGTU. 2005. #9. S. 53-57.
 5. Naumov V.A. Raschet gidrodinamicheskikh koeffitsientov maketa tralovoy doski tsilindricheskogo profilya [Calculation of hydrodynamic coefficients of the model trawl door of a cylindrical profile]. V.A. Naumov, E.G. Meylus. Promyshlennoe rybolovstvo: sbornik nauchnykh trudov. KGTU. Kaliningrad. 2004. S. 34-40.



Научный журнал 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 представляются 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 выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

Есть на складе издательства**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**

Коршунов Ю. Л.**Люди, корабли, оружие (К 70-летию 1-го ЦНИИ МО РФ)****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 176 стр.**

Книга содержит историю научно-исследовательских институтов кораблестроения и морского оружия. Автор приводит большое количество фактов, характеризующих деятельность институтов на различных этапах развития флота.

Есть в продаже: **цена 280 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.**Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И.**Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений.****Учебник для вузов****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.**Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей**СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.**Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2****СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**